

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**INFLUÊNCIA DOS MANANCIAIS QUE ABASTECEM A ETA BRASÍLIA NA
DESIDRATAÇÃO DO LODO E OTIMIZAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS**

DANIEL AUGUSTO SANTOS PRATES BELTRÃO

ORIENTADORA: CRISTINA CELIA SILVEIRA BRANDÃO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL 2

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INFLUÊNCIA DOS MANANCIAIS QUE ABASTECEM A ETA BRASÍLIA NA
DESIDRATAÇÃO DO LODO E OTIMIZAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS**

DANIEL AUGUSTO SANTOS PRATES BELTRÃO

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

APROVADA POR:

**CRISTINA CELIA SILVEIRA BRANDÃO, DSc (UnB)
(ORIENTADORA)**

**YOVANKA PÉREZ GINORIS, DSc (UnB)
(EXAMINADORA INTERNA)**

**CLÁUDIA PATRÍCIA PEREIRA SIMÕES, MSc (Caesb)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

BRASÍLIA/DF, 9 DE DEZEMBRO DE 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

BELTRÃO, DANIEL AUGUSTO SANTOS PRATES

Influência dos mananciais que abastecem a ETA Brasília na desidratação do lodo e otimização do teor de sólidos. [Distrito Federal] 2019.

xii, 79 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2019)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Lodo de ETA

2. Polímeros

3. Centrifugação

4. Teor de Sólidos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BELTRÃO, D.A.S.P. (2019). Influência dos mananciais que abastecem a ETA Brasília na desidratação do lodo e otimização do teor de sólidos. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 79 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Daniel Augusto Santos Prates Beltrão

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Influência dos mananciais que abastecem a ETA Brasília na desidratação do lodo e otimização do teor de sólidos.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrita do autor.

Daniel Augusto Santos Prates Beltrão
beltraodaniel2@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Ao longo da caminhada acadêmica, pude contar com o apoio de pessoas mais do que especiais que me ajudaram chegar até aqui, etapa final da graduação em Engenharia Ambiental, as quais não poderia deixar de reconhecer neste momento.

À minha mãe, Cléia, agradeço pelo apoio incondicional, desde a escolha do curso e da Universidade até esta última etapa, manifestado pelas mais puras formas de amor e carinho. À Ana, pela companhia em todos os momentos. A todos os meus familiares e amigos, de BH e Brasília, que de alguma forma contribuíram para a minha formação pessoal e profissional, obrigado.

À professora Cristina, agradeço por sua presença mais do que inspiradora nas disciplinas do curso, incentivando os alunos a serem melhores pessoas e profissionais. Como orientadora, agradeço por todo o compartilhamento de experiências e pelos conselhos que, sem dúvidas, contribuíram para o profissional que se forma a partir de agora.

Às instituições Caesb, Funasa e Universidade de Brasília, agradeço a oportunidade de ter feito parte destas, ciente da importância que representam perante à sociedade, agradecendo também aos seus membros e funcionários que possibilitaram a troca de experiências.

À Cláudia Simões, Cláudia Morato, Ana Paula e aos operadores da ETA Brasília, agradeço por todo o suporte necessário para a realização deste projeto, esperando que o mesmo contribua positivamente para o processo de desidratação do lodo na ETA Brasília e em outras estações de tratamento de água.

A todos os outros que de alguma forma contribuíram com este trabalho e não foram citados, meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

INFLUÊNCIA DOS MANANCIAIS QUE ABASTECEM A ETA BRASÍLIA NA DESIDRATAÇÃO DO LODO E OTIMIZAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS

Os resíduos gerados nas estações de Tratamento de água durante as etapas do tratamento, também chamados de RETAs ou lodo, representam um grande desafio para as estações, uma vez que estão associados a potenciais impactos ambientais quando lançados de volta para o meio ambiente e a custos significativos de tratamento e disposição final. Dessa forma, a etapa de desidratação do lodo ocorre para minimizar estes efeitos, podendo ser realizada por métodos naturais e mecânicos.

Na Estação de Tratamento de Água Brasília – ETA Brasília, operada pela Companhia de Saneamento Ambiental de Brasília – Caesb, a desidratação do lodo é realizada por meio do processo de centrifugação, sendo o lodo desidratado (ou torta) transportado para uma cascalheira desativada no entorno de Brasília. O líquido clarificado efluente às centrífugas tem como destino a rede de água pluvial que chega até o Lago Paranoá, importante manancial do Distrito Federal.

Porém, os resultados para o teor de sólidos da torta obtidos nas centrífugas da ETA Brasília estão abaixo de valores encontrados em outras estações de tratamento operadas pela Caesb, estando abaixo também dos valores potenciais do equipamento. Para explicar tal comportamento, foram levantadas duas hipóteses. A primeira hipótese seria que o teor de matéria orgânica no lodo, conferido pela presença de algas no reservatório Santa Maria, um dos mananciais que abastece a estação, influenciava negativamente no processo de desidratação. A segunda hipótese foi que o polímero empregado durante todo o ano na ETA Brasília não era adequado para o lodo, uma vez que a variação sazonal do lodo flotado sugeria a necessidade de variação também do polímero aplicado.

Assim, através dos experimentos realizados neste trabalho, foi possível analisar os parâmetros que influenciavam na desidratação do lodo gerado nos flotadores da ETA Brasília, com o objetivo de adequá-los, tornando a etapa de desidratação do lodo em escala real mais eficiente. Os ensaios de centrifugação foram realizados em escala de bancada, com amostras provenientes de diferentes contribuições do reservatório Santa Maria e dos Ribeirões Torto e Bananal, demais mananciais que alimentam a ETA. Quanto aos polímeros foram testados 7 diferentes materiais, com diferentes tipos e densidades de carga, além da combinação entre alguns destes polímeros.

Os resultados obtidos mostraram haver influência negativa do teor de matéria orgânica na desidratação do lodo da ETA Brasília, devido ao maior percentual de água presa no lodo. Além disso, foi possível notar que o tipo de carga dos polímeros utilizados no condicionamento não era determinante para a eficiência do processo de centrifugação quanto ao teor de sólidos do lodo desidratado, bem como a combinação entre polímeros não apresentava ganhos significativos na desidratação. Porém, para o líquido clarificado, os polímeros catiônicos foram os que representaram os menores valores de turbidez, sendo indicados para o tratamento do lodo gerado na Estação de Tratamento de Água Brasília.

PALAVRAS CHAVE: lodo de ETA, polímeros, centrifugação, teor de sólidos.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. OBJETIVO GERAL	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE RESÍDUOS.....	4
3.2. RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS EM ETA - RETAs	7
3.3. PRÉ-TRATAMENTO E TRATAMENTO DOS RESÍDUOS GERADOS EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA	11
3.3.1. Pré-tratamento do lodo	12
3.3.2. Métodos de tratamento	16
3.4. DESTINAÇÃO FINAL DO LODO DESIDRATADO	19
3.5. ETA BRASÍLIA	20
3.5.1. Manejo do lodo flotado na Estação de Tratamento de Água Brasília.....	23
4. METODOLOGIA	27
4.1. LEVANTAMENTO DE DADOS	28
4.2. TRABALHOS EXPERIMENTAIS.....	30
4.2.1. Caracterização do lodo flotado.....	30
4.2.2. Experimentos de centrifugação	30
4.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1. ETAPA I – EXPERIMENTOS PARA ADEQUAÇÃO DO POLÍMERO.....	38
5.1.1. Influência dos mananciais na desidratação do lodo.....	38
5.1.2. Características da Água Bruta	45
5.1.3. Combinação de Polímeros	46

5.2. ETAPA II – EXPERIMENTOS PARA ADEQUAÇÃO DOS DEMAIS PARÂMETROS.....	49
5.2.1. Influência da intensidade do campo gravitacional (G^*).....	49
5.2.2. Dosagem do polímero.....	51
5.2.3. Teor de Sólidos Inicial.....	55
5.3. CONTRIBUIÇÕES DOS EXPERIMENTOS NO PROCESSO DE CENTRIFUGAÇÃO EM ESCALA REAL.....	56
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
APÊNDICES	65
APÊNDICE A – RESULTADOS ÓTIMOS OBTIDOS NA ETAPA I – EXPERIMENTOS 1.1 E 1.2.....	66
APÊNDICE B – RESULTADOS ÓTIMOS OBTIDOS NA ETAPA I – EXPERIMENTOS 2.1 E 2.2.....	67
APÊNDICE C – RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA I – EXPERIMENTO 3	68
APÊNDICE D – RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA II – EXPERIMENTOS 4 E 5	69
APÊNDICE E – RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA II – EXPERIMENTO 6	70
APÊNDICE E – RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA II – EXPERIMENTO EXTRA	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características típicas do lodo de sulfato de alumínio e de sais de ferro (Adaptado de Ritcher, 2001).	9
Tabela 3.2 - Dados de substâncias componentes dos resíduos de ETAs da região metropolitana de São Paulo (Di Bernardo <i>et al.</i> , 2012).....	10
Tabela 3.3 - Teor de sólidos totais no lodo desidratado para os diferentes métodos de desidratação de lodos de hidróxidos metálicos (Adaptado de AWWA, 1996)	12
Tabela 3.4 - Metodologias adotadas para análise de desidratabilidade dos resíduos gerados em ETAs	14
Tabela 3.5 - Alternativas para a disposição do lodo desidratado	20
Tabela 3.6 - Parâmetros de operação da centrífuga da ETA Brasília.....	25
Tabela 4.1 - Métodos e equipamentos utilizados nos ensaios de caracterização do lodo bruto	30
Tabela 4.2 - Características dos polímeros aplicados nos ensaios de centrifugação	32
Tabela 4.3 - Relação dos experimentos realizados neste estudo	37
Tabela 5.1 - Relação dos experimentos realizados na Etapa I.....	38
Tabela 5.2 - Dosagens ótimas de polímeros para os experimentos da Etapa I.....	40
Tabela 5.3 - Caracterização da água bruta para os Experimentos 1.1 (100% SM), 1.2 (30% SM), 2.1 (75% SM) e 2.2 (55% SM).....	45
Tabela 5.4 - Mistura de polímeros avaliadas no Experimento 3, com 75% de contribuição do Santa Maria e 25% dos ribeirões Torto e Bananal	46
Tabela 5.5 - Relação dos experimentos realizados na Etapa II	49
Tabela 5.6 - Resultados da desidratação em centrífuga de bancada com rotação de 2000rpm	50
Tabela 5.7 - Comparação dos resultados de teor de sólidos do lodo desidratado para os Experimentos 2.1 (75% SM) e 4 (70% SM).....	54
Tabela 5.8 - Resultados da desidratação para diferentes teores de sólido inicial do lodo flotado com predominância do Reservatório Santa Maria	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Classificação geral das tecnologias de tratamento de água (Di Bernardo <i>et al.</i> , 2012).....	5
Figura 3.2 - Esquemas de pressurização na FAD: (a) Pressurização total do afluente; (b) Pressurização parcial do afluente; (c) Pressurização da recirculação (Guimarães, 2007).....	6
Figura 3.3 - Diagrama típico de coagulação do sulfato de alumínio e potencial zeta – água com turbidez alta (adaptada de Amirtharajah e Mills, 1982 <i>apud</i> . Di Bernardo, 2017)	8
Figura 3.4 - Efeito do pH no teor de sólidos (Sun <i>et al.</i> , 2015)	9
Figura 3.5 - Distribuição da água no floco de lodo Smollen e Kafaar (1994, <i>apud</i> Reali, 1999)	11
Figura 3.6 - Equipamento do ensaio de Tempo para Filtrar (Adaptado de AWWA, 1999).	15
Figura 3.7 - Opções para a desidratação do lodo na ETA Descoberto/DF (Google Earth, 2019).....	17
Figura 3.8 - Corte transversal das centrífugas (Pieralisi, 2009)	19
Figura 3.9 – Fluxograma de processos da ETA Brasília (Caesb, 2011).....	21
Figura 3.10 - Visão geral das unidades de tratamento da ETA Brasília (Google Earth, 2017)	22
Figura 3.11 – Corte esquemático de uma unidade de flotador da ETA Brasília (Adaptado de Caesb, 2011)	23
Figura 3.12 - Tela do supervisor do sistema de desidratação de lodo da ETA Brasília (Adaptado de Caesb, 2011)	24
Figura 3.13 - Disposição do lodo desidratado da ETA Brasília em cascalheira desativada na região do Sol Nascente/DF	26
Figura 4.1 - Vazão e contribuição percentual dos mananciais que abasteceram a ETA Brasília - janeiro/2018 a abril/2019	27
Figura 4.2 - Etapas metodológicas do trabalho	28
Figura 4.3 – Coletor adaptado (a). Final da rosca sem fim (b).....	34
Figura 4.4 - Agitador mecânico empregado para agitação rápida.....	35
Figura 4.5 - Processo manual de agitação lenta para floculação	35
Figura 5.1 – Teor de sólidos da torta para diferentes contribuições do reservatório Santa Maria.....	39

Figura 5.2 – Comparação da turbidez do clarificado para diferentes polímeros, com diferentes contribuições do reservatório Santa Maria nos: (a) Experimento 1.1 (100% SM) (b) Experimento 1.2 (30% SM) (c) Experimento 2.1 (75% SM) e (d) Experimento 2.2 (55% SM)	42
Figura 5.3 - Comparação da turbidez do clarificado para diferentes polímeros no Experimento 4 (70% Santa Maria)	44
Figura 5.4 - Formação de grumos resultantes da reação entre polímeros de diferentes cargas	47
Figura 5.5 - Resultados obtidos com a mistura de polímeros a partir da combinação de: (a) polímero aniônico de alta carga com polímeros catiônicos e (b) polímero catiônico de alta carga com polímeros aniônicos	48
Figura 5.6 - Comparação dos resultados para teor de sólidos do lodo desidratado e turbidez residual do líquido clarificado dos Experimentos 5 (75% SM e 2000 rpm) e 2.1 (75% SM e 3540 rpm)	50
Figura 5.7 - Influência da dosagem de polímeros no teor de sólidos totais da torta no Experimento 4 (70% SM) para os polímeros: (a) AN1 (b) AN2 (c) AN3 (d) NI (e) CA1 (f) CA2 (g) CA3	52
Figura 5.8 - Teor de sólidos e turbidez obtidos para diferentes concentrações do polímero CA3 no Experimento 6 (75% SM)	54
Figura 5.9 – Comparação do resultado obtido entre a aplicação polímeros preparados na ETA Brasília e no laboratório	58

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMECLATURAS E ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADASA	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
AWWA	American Water Works Association
Caesb	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
DF	Distrito Federal
ETA	Estação de Tratamento de Água
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira
PAC	Policloreto de Alumínio
pH	potencial Hidrogeniônico
ppb	partes por bilhão
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RETA	Resíduo Gerado nas Estações de Tratamento de Água
SS	Sólidos em Suspensão

1. INTRODUÇÃO

As Estações de Tratamento de Água têm como objetivo tornar as águas naturais próprias para o consumo humano, atendendo aos padrões de potabilidade estabelecidos pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde. Para tal, é necessário a redução das impurezas que estão contidas na água a níveis aceitáveis por meio de processos de tratamento e aplicação de produtos químicos. Muitos desses processos geram em suas unidades resíduos líquidos (águas de lavagem), bem como sólidos ou semissólidos, comumente chamado de lodo.

O lodo é obtido nas etapas que envolvem separação das fases líquida e sólida da água e nele estão concentrados materiais que são removidos no tratamento, como partículas em suspensão, microrganismos patogênicos e produtos químicos utilizados no tratamento, em particular os coagulantes. Dessa forma, o lodo deve ser removido e disposto de maneira adequada para que não represente risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente. Porém, essa prática não é ainda difundida no cenário atual do nosso país. De acordo com a última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PSNB (IBGE, 2008), em 2008 dos 5564 municípios brasileiros há geração de lodo no processo de tratamento de água, dentre os quais mais de 67% destinam seus resíduos para rios, geralmente sem qualquer tipo de tratamento.

A disposição sem nenhum tratamento prévio nos corpos hídricos não está em consonância com as normas e leis que regulam a disposição final desse material, dentre elas a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010 do Ministério do Meio Ambiente e a NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004), além da Resolução CONAMA nº 430/2011. Para o correto manejo dos resíduos de Estações de Tratamento de Água é necessária a adequação das ETAs à legislação vigente, facilitada pela adoção da desidratação do lodo, que tem como finalidade a redução no volume que deve ser descartado, reduzindo também os custos de transporte e disposição, bem como o impacto ambiental que a destinação final representa.

A Estação de Tratamento de Água Brasília – ETA Brasília realiza a desidratação do lodo gerado nos flotores por meio de centrifugação. No entanto, os teores de sólidos do lodo desidratado obtidos atualmente são inferiores ao que usualmente são encontrados em outras

Estações de Tratamento de Água operadas pela Caesb - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal, que adotam o mesmo método de desidratação, além de estarem abaixo da faixa ideal de teor de sólidos nos lodos potencial desidratados pelas centrífugas.

Para explicar a baixa eficiência da desidratação por centrífugas na ETA Brasília, foram levantadas as hipóteses de que o polímero utilizado no condicionamento do lodo flotado para auxiliar o processo de centrifugação não é o mais indicado para as características do lodo gerado nos flotadores da ETA durante todo o ano, uma vez que a variação sazonal do lodo flotado sugere a necessidade de variação também do polímero aplicado. A outra hipótese é que a qualidade da água bruta dos mananciais de abastecimento que alimentam a ETA Brasília conferem ao lodo características que influenciam a desidratação, principalmente o teor de matéria orgânica conferido pela presença de algas, comportamento observado quando predomina a contribuição do reservatório Santa Maria na água que alimenta a estação de tratamento.

Nesse contexto, propôs-se a realização de estudo em escala de bancada para entender o processo de desidratação e identificar os fatores influentes na baixa eficiência deste pelas centrífugas da ETA Brasília, contribuindo para a melhoria do processo de desidratação do lodo em escala real.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar, em escala de bancada, o processo de desidratação do lodo flotado da Estação de Tratamento de Água – ETA Brasília, buscando o aumento da eficiência do processo em escala real.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos propostos para o trabalho em questão são:

- Avaliar o efeito das características da água bruta na eficiência da desidratação do lodo flotado;
- Avaliar o efeito do condicionamento com polímeros na eficiência da desidratação por centrifugação;
- Avaliar o efeito da combinação de mais de um tipo de polímero sobre a eficiência da desidratação por centrífuga.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão abordados inicialmente os conceitos relacionados ao tratamento de água em Estações de Tratamento de Água – ETAs e aos Resíduos Gerados em ETAs – RETAs, sendo apresentado, dentre vários aspectos, as características do lodo gerado durante os processos de tratamento de água e como elas influenciam na desidratação, as alternativas aplicadas atualmente para desidratá-los e as opções de destinação final ou reuso. Não obstante, serão alvo desse estudo também, os processos aplicados no tratamento da água bruta afluente à Estação de Tratamento de Água Brasília – ETA Brasília, a geração de resíduos na ETA Brasília, a descrição de suas características e as técnicas de manejo empregadas atualmente.

3.1. ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E GERAÇÃO DE RESÍDUOS

De acordo com a NBR 12.216 (ABNT, 1992), Estação de Tratamento de Água – ETA é o conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade, sendo essas unidades, cada um dos elementos da ETA em que certo processo de tratamento se realiza.

Diversas podem ser as operações e processos utilizados no tratamento da água afluente às ETAs. Di Bernardo *et al.* (2009) considera que a escolha da tecnologia a ser empregada deverá ser função de aspectos não somente técnicos, como a qualidade da água a ser tratada, mas também econômicos, ambientais e sociais, que envolvem: o meio ambiente e os recursos locais de onde será captada a água bruta e construída a ETA; as tecnologias de tratamento de água disponíveis; os custos e gastos de construção, operação e manutenção e as condições da comunidade a ser atendida pela estação.

No entanto, a qualidade da água bruta é parâmetro fundamental para a pré-seleção das tecnologias de tratamento de água tecnicamente factíveis (Di Bernardo *et al.*, 2012). Considerando apenas esse aspecto, as tecnologias podem ser resumidas em dois grupos, sem coagulação e com coagulação, conforme indicado na Figura 3.1.

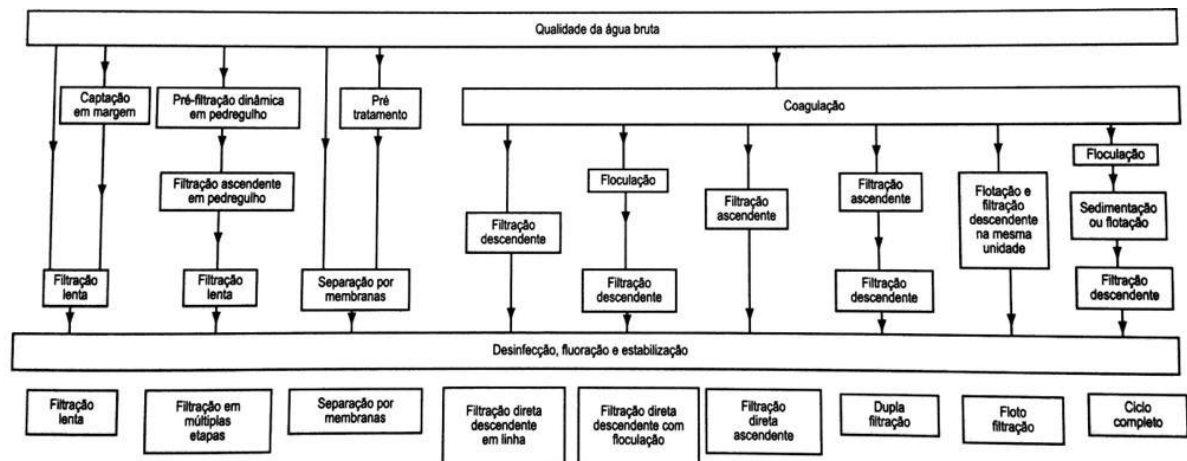


Figura 3.1 - Classificação geral das tecnologias de tratamento de água (Di Bernardo *et al.*, 2012).

A maior parte das etapas que compõem as tecnologias ilustradas na Figura 3.1 geram, ao final de seus processos, resíduos provenientes da separação das impurezas contidas na água bruta e dos produtos químicos utilizados no tratamento. O maior volume de resíduos, porém, é gerado no processo de lavagem das unidades de filtração, enquanto a maior concentração de sólidos nos resíduos é gerada nas unidades de Sedimentação/Flotação, quando existem, responsáveis por separar da água os flocos gerados nas etapas precedentes.

Por esse motivo é que nas demais etapas de tratamento de água, a remoção dos resíduos ocorre com longa periodicidade, apenas na limpeza das unidades, enquanto que na filtração e na sedimentação ou flotação é necessário a remoção e, conseqüentemente, o tratamento e disposição dos resíduos em curtos intervalos de tempo, a depender dos fatores relativos à operação dessas unidades. Segundo Di Bernardo *et al.* (2012), a frequência de limpeza dos decantadores convencionais em ETAs de pequeno porte sem remoção mecanizada do lodo varia de 1 a 4 meses, a depender da qualidade da água bruta, enquanto a lavagem dos filtros, em geral, é realizada em intervalos que variam de 12 a 48 horas. Já nos flotadores e decantadores de alta taxa, a remoção do lodo é mecanizada, podendo ser feita diariamente ou até mesmo em períodos menores, a depender da vazão tratada nas estações compostas por essas unidades.

Dentre as tecnologias apresentadas na Figura 3.1, destaca-se o fluxograma da tecnologia de ciclo completo, também chamada tratamento convencional, contendo maior número de processos que, basicamente, são: Coagulação, Floculação, Sedimentação ou Flotação,

Filtração e Desinfecção. A Estação de Tratamento de Água Brasília – ETA Brasília, alvo deste estudo, emprega atualmente a tecnologia de tratamento convencional com flotação por dissolvido.

A flotação é o processo físico de separação gravitacional, no qual microbolhas de ar entram em contato com as partículas sólidas ou líquidas em suspensão, resultando em um aglomerado floco-bolha de densidade aparente inferior à da água. A diferença de densidade, portanto, aumenta a força de empuxo desse aglomerado, causando sua ascensão até a superfície do líquido, onde se acumula em forma de lodo para ser removido posteriormente.

Quanto à flotação por ar dissolvido, há três principais sistemas, que são a flotação a vácuo, microflotação e flotação pressurizada. Dentre esses sistemas, a flotação pressurizada, onde o ar é dissolvido na água sob pressão é a mais amplamente utilizada, principalmente nos casos em que estão presentes agregados de flocos da fácil desagregação (Centurione, 2002), uma vez que não envolve forte agitação e, porque permite um melhor controle da produção de bolhas de ar (Guimarães, 2007). Este processo apresenta ainda três diferentes configurações: pressurização parcial do afluente, pressurização total do afluente e pressurização da recirculação, dispostos na Figura 3.2.

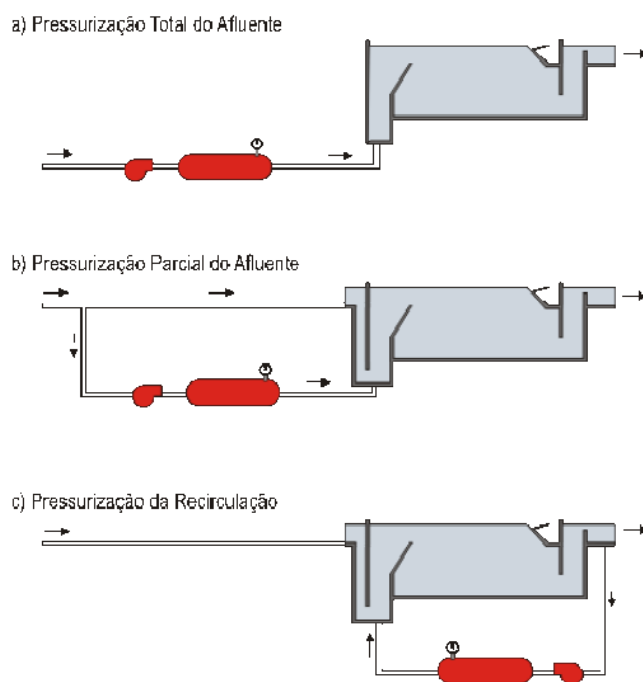


Figura 3.2 - Esquemas de pressurização na FAD: (a) Pressurização total do afluente; (b) Pressurização parcial do afluente; (c) Pressurização da recirculação (Guimarães, 2007)

A configuração mais comum no tratamento de água, também adotada na ETA Brasília, é a flotação por ar dissolvido, com pressurização da água clarificada recirculada, pois essa alternativa evita destruição dos flocos devido à pressurização da água floculada. Nesse processo, uma parcela de água clarificada é saturada com ar sob pressão elevada e, posteriormente, injetada no tanque de flotação por meio de dispositivos redutores de pressão. Na saída destes dispositivos ocorre a formação das microbolhas de ar que entram em contato com a água floculada produzindo um aglomerado floco-bolha que ascende à superfície do tanque, formando uma camada de lodo a ser removida.

3.2. RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS EM ETA - RETAs

Ritcher (2001) considera como lodo de uma estação de tratamento de água, o resíduo constituído de água e sólidos suspensos provenientes da água bruta, acrescidos dos produtos químicos aplicados à água durante os processos de tratamento que transformam a água bruta em água própria para o consumo humano, atendendo aos padrões vigentes de potabilidade.

Segundo Di Bernardo *et al.* (2012), as características quantitativas e qualitativas dos resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água dependem de diversos fatores relativos às ETAs como a qualidade da água bruta, a tecnologia de tratamento de água, a eficiência das unidades de tratamento, as características e dosagens dos produtos químicos empregados e as condições de operação e manutenção.

Bache e Papavasiliopoulos (2003) complementam que, além das substâncias presentes na água bruta, o tipo de coagulante, em conjunto com o mecanismo de coagulação e a cinética do processo, também influenciam na composição do lodo. Os processos de coagulação estão estritamente relacionados com a dosagem do coagulante e a faixa de pH de coagulação aplicada. Por exemplo, no diagrama de coagulação mostrado na Figura 3.3, é possível notar que em função da dosagem de sulfato de alumínio e do pH de coagulação, atuam diferentes mecanismos de coagulação, com geração de flocos com diferentes características e, consequentemente, com diferentes composições.

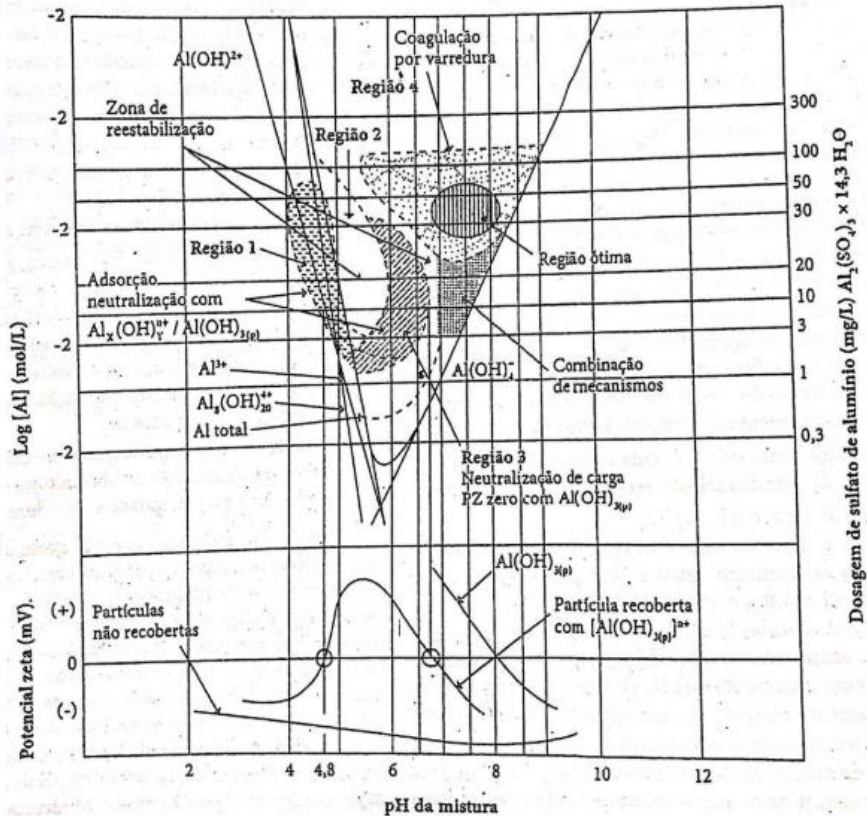


Figura 3.3 - Diagrama típico de coagulação do sulfato de alumínio e potencial zeta – água com turbidez alta (adaptada de Amirtharajah e Mills, 1982 *apud*. Di Bernardo, 2017)

A mudança no pH da água bruta indicará, ainda, a alteração na qualidade do manancial e a necessidade de adequação da dosagem de produtos químicos utilizados na coagulação para a obtenção do resultado esperado, fazendo com que a quantidade de lodo gerado no processo de clarificação, que deverá ser desidratado, também se altere.

Além disso, Sun *et al.* (2015) demonstraram que o pH do sobrenadante nos resíduos de Estação de Tratamento de Água, de forma direta, influencia na desidratação do lodo. Em estudo utilizando o lodo da Estação de Tratamento de Água de Chongqing (China), os autores observaram que o máximo teor de sólidos obtidos na desidratação com o condicionamento de três diferentes polímeros catiônicos: CPAM1, CPAM2 e CPAM3 com 38, 40 e 21% de densidade de cargas catiônicas, foi obtido em valor de pH 7. Em condições muito alcalinas ou muito ácidas, o desempenho da desidratação se mostrou muito inferior, como pode ser visto na Figura 3.4, indicando que a condição neutra de pH é adequada para a desidratação do lodo.

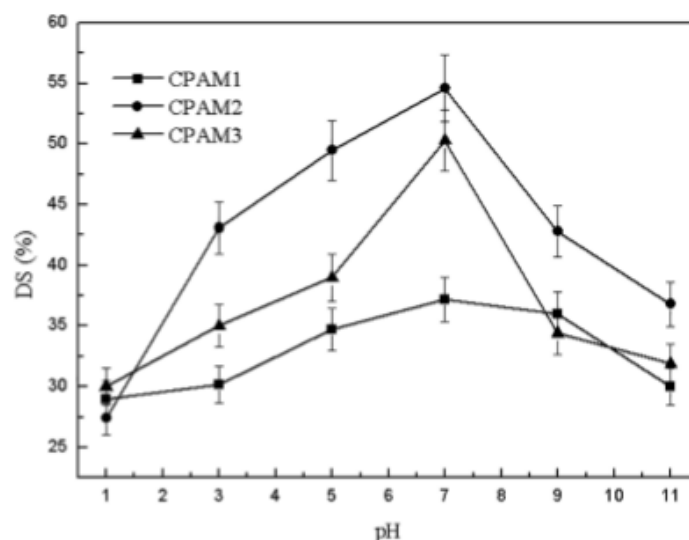


Figura 3.4 - Efeito do pH no teor de sólidos (Sun *et al.*, 2015)

Destaca-se também que, além da dosagem, o tipo de coagulante utilizado é responsável pelas características do lodo. Segundo Ritcher (2001), o lodo originado do uso de sulfato de alumínio é um líquido não-newtoniano, gelatinoso, constituído de hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas, coloides que conferem cor e outros resíduos orgânicos, inclusive bactérias e outros organismos desestabilizados no processo de coagulação. Tal resíduo adensa com relativa facilidade, porém sua característica de baixa compactação resulta em um grande volume e baixo teor de sólidos.

Os lodos provenientes da coagulação com sais de ferro apresentam características semelhantes às do lodo de sulfato de alumínio, e as características típicas de ambos, segundo Ritcher (2001) podem ser vistas e comparadas nas Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características típicas do lodo de sulfato de alumínio e de sais de ferro (Adaptado de Ritcher, 2001).

Lodo	Sólidos Totais (%)	Al (%)	Fe (%)	pH
Sulfato de alumínio	0,1 – 4	15 – 40	-	6 - 8
Sais de Ferro	0,25 – 3,5	-	4,6 -20,6	7,4 – 9,5

Já o Policloreto de Alumínio (PAC) é um tipo de polímero inorgânico de alto peso molecular, usado como coagulante em Estações de Tratamento de Água. Segundo Constantino e

Yamamura (2009), devido à basicidade do PAC, este produto libera durante a hidrólise, em igualdade de íons metálicos, uma quantidade de ácido consideravelmente menor do que a liberada por coagulantes tradicionais como o Sulfato de Alumínio e o Sulfato Ferroso, provocando uma menor variação do pH da água e um menor consumo de alcalinizante para garantir o pH de coagulação da água ao seu valor original.

Ainda segundo os autores, o PAC apresenta outras vantagens como a efetividade em largas faixas de pH e o menor consumo de coagulante, uma vez que o pH da água permanece praticamente sem alteração, mesmo na possível situação de superdosagem do PAC, diminuindo a concentração de alumínio no lodo.

O alumínio no lodo gerado nas unidades de decantação e flotação é combinado, muitas vezes, com a presença de outras substâncias indesejáveis, principalmente outros íons metálicos, contaminantes orgânicos e microrganismos patogênicos, como pode ser observado na Tabela 3.2, que lista alguns metais presentes nos resíduos das descargas de decantadores de diferentes ETAs no estado de São Paulo.

Tabela 3.2 - Dados de substâncias componentes dos resíduos de ETAs da região metropolitana de São Paulo (Di Bernardo *et al.*, 2012)

Parâmetro	Guaraú	ABV	Rio Claro	Rio Grande	Teodoro Ramos	Alto Cotia
Alumínio (mg/kg)	65.386	7.505	6.690	83.821	123.507	95.541
Cobre (mg/kg)	23	1.109	14.883	25	2.791	< 5
Ferro (mg/kg)	32.712	281.508	449.774	32.751	41.259	30.080
Floureto (mg/kg)	152	86	150	42	46	38
Manganês (mg/kg)	3.146	1.684	6.756	136	5.181	453
Sódio (mg/kg)	6.609	1.027	41.482	563	3.222	453
Zinco (mg/kg)	59	57	75	47	145	66
Organoclorados (ppb)	ND	0,02	0,02	-	-	ND
Carbamatos (ppb)	ND	8,4	ND	-	-	ND
Sólidos Totais (mg/L)	24.957	17.412	14.486	11.043	5.518	10.692

Além disso, quando há presença de algas na água bruta, o lodo torna-se mais complexo e comporta-se como uma mistura de lodos inorgânicos e orgânicos. Portanto, é razoável postular que as espécies e a concentração de algas nos lodos afetam as características dos

mesmos, tais como as propriedades da superfície, a distribuição de umidade, bem como as características de condicionamento e desidratação (Pan *et al.*, 1998).

3.3. PRÉ-TRATAMENTO E TRATAMENTO DOS RESÍDUOS GERADOS EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Considerando o seu potencial risco ambiental e sua grande produção, Hu e Wang (2017) destacam que os resíduos necessitam ser desidratados para a redução de seu volume, de forma que beneficie seu manejo e disposição final. Porém, a eficiência na desidratação depende da forma em que a água está distribuída nos lodos.

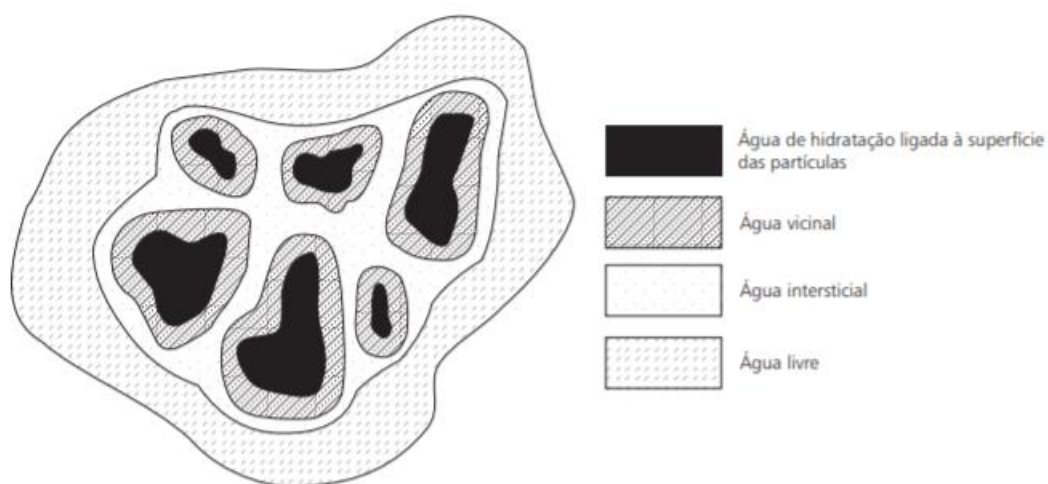


Figura 3.5 - Distribuição da água no floculo de lodo Smollen e Kafaar (1994, apud Reali, 1999)

A fração de água no lodo pode ser classificada simplesmente em água livre e água presa, ou nas seguintes categorias (Figura 3.5), apresentadas em ordem crescente de dificuldade de separação (Ritcher, 2001; Reali, 2008; Hu e Wang, 2017, entre outros):

- Água livre: não associada com partículas sólidas, podendo ser separada facilmente dos sólidos por gravidade ou por filtração;
- Água intersticial ou capilar: água ligada mecanicamente, a qual se encontra presa aos interstícios dos flocos, podendo ser liberada se a estrutura do floculo for destruída, sendo removida por força mecânica ou pelo uso de floculante;
- Água vicinal: constituída por multiplicas camadas de moléculas de água fisicamente ligadas, as quais se encontram firmemente presas à superfície da partícula por meio

de pontes de hidrogênio sendo apenas removidas na filtração, pela ação de gradientes de pressão que vençam as resistências à sua separação, como a tensão superficial.

- Água de ligação química ou hidratação: água quimicamente ligada à superfície das partículas sólidas e, somente removida pelo aumento da energia térmica.

Devido às diferenças significativas das características quantitativas e qualitativas dos RETAs, gerados por diferentes tecnologias de tratamento de água, a concepção dos sistemas de tratamento dos resíduos gerados em ETAs pode diferir consideravelmente (Di Bernardo *et al.*, 2012). Dessa forma, a AWWA sugere que uma escolha prévia do processo a ser aplicado no tratamento do lodo pode ser baseada nas concentrações percentuais de sólidos no lodo desidratado que os diferentes processos podem alcançar. Para os resíduos obtidos a partir de processos no tratamento com o uso de hidróxidos metálicos, os valores típicos encontrados são mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Teor de sólidos totais no lodo desidratado para os diferentes métodos de desidratação de lodos de hidróxidos metálicos (Adaptado de AWWA, 1996)

Concentração de sólidos	Processo Sugerido
≤8%	Adensamento
8-35%	Desidratação
>35%	Secagem

Apesar da elevada concentração de sólidos no lodo desidratado, o processo de desidratação mecanizada exige, em muitos casos, teor de sólidos mínimo na sua alimentação para garantir resultados satisfatórios, geralmente acima de 20% para o teor de sólidos. Este é o caso das centrífugas, onde alguns fabricantes recomendam que a concentração de sólidos na alimentação esteja por volta de 2-3%, sendo necessário, por vezes, um pré-tratamento dos resíduos gerados em ETAs, geralmente o adensamento por flotação ou sedimentação. A eficiência do processo de desidratação ainda é influenciada pelo percentual de água livre presente no lodo, que pode ser potencializada por meio de seu condicionamento.

3.3.1. Pré-tratamento do lodo

Pré-tratamento neste estudo será considerado como toda ação anterior a desidratação, que tenha o objetivo de facilitar esse processo. Dentre os métodos mais utilizados, se destacam

o adensamento, que pode ser realizado por gravidade (ou empuxo), como é o caso da sedimentação e flotação, e o condicionamento do lodo, ressaltando-se que, em muitos casos, as duas alternativas são utilizadas em conjunto.

3.3.1.1. Condicionamento

Segundo a AWWA (1996), o condicionamento de RETAs é feito por condicionamento químico ou condicionamento físico, estando o condicionamento químico incluído na maioria dos processos de desidratação mecânicos, com a aplicação de polímeros ou outros tipos de substâncias para auxiliar na floculação das partículas. O tipo e dosagem do condicionante químico varia de acordo com diversos fatores, dentre eles a qualidade da água bruta e o coagulante utilizado, o teor de sólidos desejado e o processo de adensamento/desidratação adotados na sequência.

Os polímeros são classificados em catiônicos, que fornecem cargas positivas para o meio, e os aniônicos que fornecem cargas negativas. Há ainda os polímeros não iônicos. O processo de desestabilização e agregação de partículas a partir do condicionamento do lodo com esses materiais, se dá segundo Ma *et al.* (2007) por dois principais mecanismos: a neutralização de cargas e a formação de pontes interpartículas, detalhadas a seguir por Metcalf & Eddy (2006):

- Neutralização de carga, onde os polímeros atuam como coagulantes que neutralizam ou reduzem a carga das partículas. Para efetuar a neutralização de cargas, o polímero deve ser adsorvido na partícula e deve-se fornecer intensidade de mistura suficiente para causar à adsorção do polímero às partículas coloidais.
- Formação de pontes de polímeros interpartículas, onde a ação do polímero se dá mediante a formação de pontes interpartículas. Nesse caso, os polímeros se ligam a diversos sítios de adsorção das partículas e uma ponte é formada quando duas ou mais partículas são adsorvidas ao longo do comprimento do polímero. As diversas partículas que integram o sistema de pontes se entrelaçam com outras pontes de partículas durante o processo de floculação. O tamanho das partículas em três dimensões cresce até que sejam facilmente removidas por sedimentação.
- Neutralização de cargas e formação de pontes de polímeros onde, além de reduzir a carga superficial da partícula, os polímeros também formam pontes.

Sun *et al.* (2015) complementam que os principais mecanismos que agem durante o processo de floculação das partículas de lodo, envolvem as pontes interpartículas sobre condições ácidas e a combinação entre a neutralização de cargas e a interação de pontes interpartículas em condições neutras e alcalinas.

Já o condicionamento físico, menos usual, é adotado para promover o aumento da eficiência de desidratação através dos seguintes processos: congelamento e descongelamento e o condicionamento térmico em altas temperaturas. Este, é tipicamente efetivo quanto há grande percentual de matéria orgânica presente nos sólidos.

O congelamento e descongelamento, segundo Hu e Wang (2017), é uma forma de condicionamento efetiva para promover a desidratabilidade dos RETAs. Os experimentos realizados pelos autores demonstraram que após submetida ao congelamento e descongelamento, a parcela de água presa no lodo foi reduzida, facilitando a desidratação do lodo por meio de eletro-osmose. Porém, a utilização do mesmo é usual em locais com climas frios, realizada ao ar livre pois, caso contrário, demandaria elevado consumo energético.

A facilidade que os lodos são desidratados é muitas vezes medida pelo parâmetro de desidratabilidade, por meio da realização de alguns ensaios, listados na Tabela 3.4, que analisam a desidratabilidade de forma indireta, dispensando o uso dos equipamentos de desidratação para a definição das melhores condições de condicionamento, o que pode significar principalmente economia de tempo nos estudos de tratabilidade.

Tabela 3.4 - Metodologias adotadas para análise de desidratabilidade dos resíduos gerados em ETAs

Métodos	Referências
CST – Tempo de Sucção Capilar	Wu <i>et al.</i> (1996), Pan <i>et al.</i> (1998), Bache e Papavasiliopoulos (2003), Ma <i>et al.</i> (2007).
SRF – Resistência Específica à Filtração	Wu <i>et al.</i> (1996), Bache e Papavasiliopoulos (2003), Sun <i>et al.</i> (2015), Yan <i>et al.</i> (2017), Ma <i>et al.</i> (2007).
Dilatômetro	Wu <i>et al.</i> (1996), Pan <i>et al.</i> (1998).
Análise de Dimensões Fractais	Sun <i>et al.</i> (2015), Yan <i>et al.</i> (2017).

Dentre esses ensaios, destaca-se o Tempo de Sucção Capilar – CST, que mede o tempo requerido pela fração líquida do lodo flotado para atravessar um meio poroso, geralmente um papel filtro específico, expresso em segundos. Wu *et al.* (1996), porém, constataram, a partir da comparação deste com outros métodos, que a determinação da dosagem ótima de polímero com base no ensaio de CST pode levar a uma superdosagem. Outro método muito utilizado para a análise de desidratabilidade do lodo em estudos de diversos autores foi o de Tempo para Filtrar, similar ao método de Resistência Específica à Filtração – SRF, que utiliza o aparato experimental ilustrado na Figura 3.6

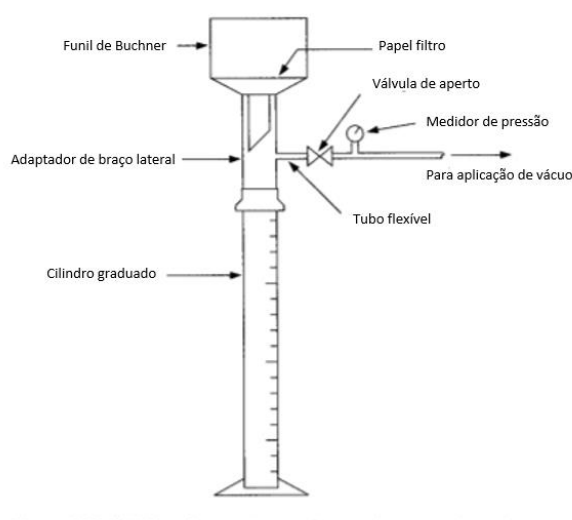


Figura 3.6 - Equipamento do ensaio de Tempo para Filtrar (Adaptado de AWWA, 1999).

Tal ensaio consiste em colocar uma amostra de lodo bruto em funil de Buchner (Figura 3.6) com filtro suporte de papel, aplicando vácuo e medindo o tempo requerido para que 100mL do lodo seja filtrado.

Já o dilatômetro, foi o método mais observado entre os ensaios que analisam o percentual de água presa no lodo. Esse método é baseado na teoria de que a água presa não congela em temperaturas inferiores ao ponto de congelamento da água livre (Pan *et al.*, 1998). Se o total de água no lodo, bem como o percentual de água que congelou são conhecidos, o percentual de água presa pode ser estimado por balanço de massa. Quanto maior for o percentual de água presa no lodo, mais difícil será desidratá-lo e, portanto, menor a sua desidratabilidade.

Os estudos mais recentes sobre o condicionamento com polímeros trouxeram uma nova perspectiva para a análise da desidratabilidade, através da análise microscópica das dimensões fractais dos flocos formados a partir do condicionamento do lodo com polímeros. Nos estudos de Sun *et al.* (2015), a dimensão fractal foi a medida quantitativa da estrutura do floco e descrição de como as partículas originais foram distribuídas no interior dos flocos. Os autores, então, observaram que as dimensões fractais eram correlacionadas ao tamanho dos flocos e que o aumento dessas características influenciava negativamente no teor de sólidos totais no lodo desidratado, pois o incremento dessas características indicava aumento na viscosidade do lodo e a maior dificuldade em desidratá-lo.

3.3.2. Métodos de tratamento

As tecnologias utilizadas para tratamento dos resíduos resumem-se basicamente à separação das fases líquida e sólida, aumentando a concentração dos sólidos no material sedimentado por clarificação/adensamento e desidratação, de maneira que o reuso do sobrenadante e a disposição final do material sedimentado sejam possíveis (Centurione, 2002; Di Bernardo *et al.*, 2012). A desidratação nas Estações de Tratamento de Água acontece por duas principais tecnologias, natural e mecanizada, descritas a seguir.

3.3.2.1. Processos Naturais

Os métodos naturais de desidratação são aqueles realizados apenas por agentes naturais, tais como a gravidade, evaporação ou a drenagem, não utilizando nenhum acessório mecanizado. Esses processos têm como principal vantagem, além dos melhores resultados para o teor de sólidos no lodo desidratado, como mostrado na Tabela 3.3, a simplicidade de operação, tornando-os facilmente operáveis. Os processos naturais também possuem menor gasto energético quando comparados às formas mecânicas de desidratação.

Segundo Ritcher (2001), os dispositivos não mecânicos de desidratação mais comuns são as lagoas e os leitos de secagem. Porém, devido ao seu alto custo, relacionado principalmente à exigência de áreas com grandes dimensões e a necessidade escavação e movimentação de terra, esses dispositivos são indicados apenas para estações de tratamento de pequeno porte, usualmente com capacidade menor do que 200 l/s. Pelo fato de serem influenciados pelas condições climáticas locais, as técnicas naturais são limitadas, preferivelmente, instalados

em regiões em que a taxa de evaporação é superior à de precipitação (Di Bernardo *et al.*, 2012).



Figura 3.7 - Opções para a desidratação do lodo na ETA Descoberto/DF (Google Earth, 2019).

A Figura 3.7 mostra três opções de tratamento para a desidratação do lodo na Estação de Tratamento de Água do Rio Descoberto em Brasília/DF: o prédio de desidratação do lodo, composto por 3 centrífugas e 2 tanques de preparação de polímero; os leitos de secagem e a lagoa facultativa, que atualmente são utilizados apenas em caso de paralisação das centrífugas para manutenção. A discrepância na demanda de área para a desidratação do processo fica clara na imagem e, demonstra a inviabilidade de se adotar os métodos naturais em locais onde a disponibilidade de área é limitada.

3.4.2.2. Processos Mecânicos

Os métodos mecânicos utilizados atualmente para a desidratação do lodo usam um ou uma combinação dos princípios de separação por sedimentação em um campo de forças (gravitacional, centrífugo) ou a filtração, quando os sólidos são grandes o suficiente para serem retidos num meio ou superfície filtrante (Ritcher, 2001). O princípio de filtração pode ser exemplificado pelos equipamentos filtro prensa e prensa desaguadora. Já o gravitacional abrange principalmente o método de centrifugação, muito encontrado nas Estações de Tratamento de Água e Esgoto para desidratação do lodo.

A desidratação centrífuga é o processo de separação da fase sólida e fase líquida, resultando na desidratação dos sólidos e clarificação do líquido, por meio da força centrífuga gerada no interior dos equipamentos com velocidade de rotação extremamente elevada de seus tambores, geralmente entre 2000 e 6000 rotações por minuto (rpm), resultando em acelerações de 1000 a 5000 vezes a aceleração da gravidade.

O lodo bruto conduzido para um tanque de armazenamento, provido de misturador submersível ou agitador tipo turbina, é bombeado para uma câmara da centrífuga, recebendo solução de polímero na tubulação de recalque (Di Bernardo *et al.*, 2002; Di Bernardo *et al.*, 2012; Centurione, 2002). O uso de polímeros se justifica pela melhora da qualidade do clarificado, aumento da capacidade de tratamento e frequentemente aumento no teor de sólidos do lodo desidratado ou torta (AWWA, 1996). A aplicação correta desses condicionadores também confere ao lodo maior coesão entre os sólidos retidos no interior da centrífuga, possibilitando remoção contínua e eficiente dos mesmos (Reali, 1999).

As centrífugas consistem, essencialmente, em um tambor cilíndrico horizontal, sem perfurações, o qual, quando rotacionado, promove a separação acelerada dos sólidos e sua acumulação na parede interna. Os sólidos são continuamente arrastados para uma das extremidades do cilindro por meio de rosca transportadora helicoidal, com forma cônica convergente na região de descarga dos sólidos, que pode ser vista na Figura 3.8, assim como as demais componentes da centrífuga (Di Bernardo *et al.*, 2012).

No caso específico da centrifugação de lodos, as partículas sólidas (flocos) em suspensão aquosa, ao entrarem no tambor rotativo da centrífuga, são imediatamente submetidas a uma separação de fases extremamente acelerada. Dependendo do tamanho, os flocos podem atingir rapidamente a parede do tambor. Ao atingirem a parede, aderem-se à mesma, separando-se da fase líquida e promovendo a formação de uma torta bastante espessa (Reali, 1999).

Uma das vantagens das centrífugas é que a intensidade do campo gravitacional promovida pelo seu funcionamento pode ser estimada em função do raio do equipamento e da velocidade aplicada, de maneira que seja possível reproduzir as condições de operação em

escala real em escala de bancada, apenas com a adaptação desses parâmetros, como veremos à frente, no item 4 (Metodologia).

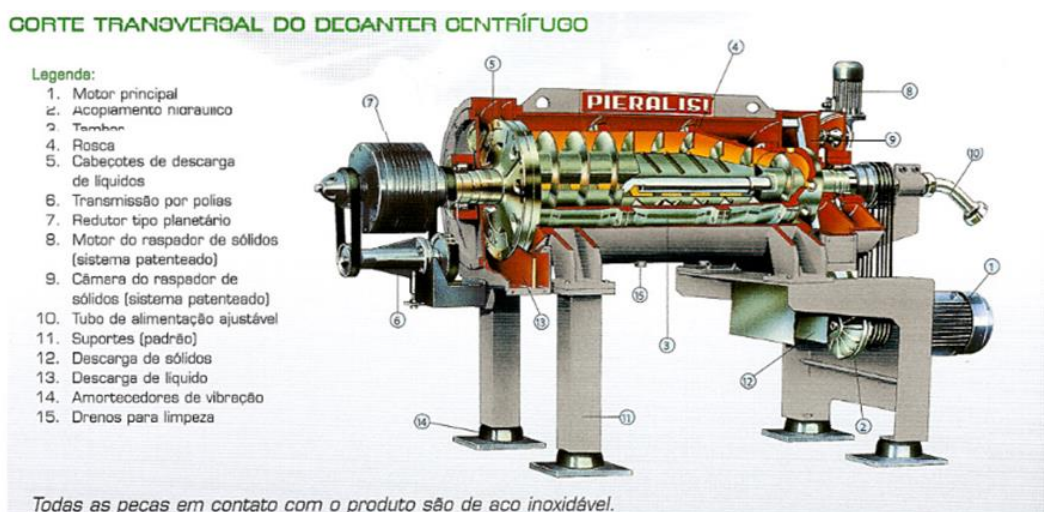


Figura 3.8 - Corte transversal das centrífugas (Pieralisi, 2009)

Outra grande vantagem da desidratação por centrífugas está na sua flexibilidade operacional. Esse equipamento permite alteração dos parâmetros operacionais, tais como o tempo de detenção do lodo, a velocidade de rotação, o nível de clarificado dentro da centrífuga, entre outros, que podem influenciar no resultado final. Porém, é desejável um teor mínimo de sólidos no lodo alimentado, geralmente de 2%, para que o teor de sólidos no lodo desidratado esteja entre 20 e 30% possibilitando sua destinação final.

3.4. DESTINAÇÃO FINAL DO LODO DESIDRATADO

A definição do destino final para o lodo de uma estação de tratamento de água é uma das tarefas mais difíceis para o administrador do serviço de abastecimento de água, envolvendo custos elevadíssimos de transporte e restrições ao meio ambiente (Ritcher, 2001). Entre as alternativas de disposição usualmente utilizadas, têm-se a disposição no solo e o lançamento em cursos de água, que estão sujeitos a permissão dos órgãos ambientais responsáveis pelas áreas a serem utilizadas. No caso da disposição em aterros sanitários, é necessário a permissão da empresa responsável pela operação e, geralmente, é exigido um teor de sólidos mínimo que varia de 15 a 25%.

Outras formas de disposição final e alternativas que substituem essas práticas podem ser vistas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Alternativas para a disposição do lodo desidratado

Autores (ano)	Método de Destinação Final ou Reaproveitamento
Teixeira <i>et al.</i> (2005), Bittencourt <i>et al.</i> (2012)	Aplicação em solo degradado
Brandão e Silva (2003), Freitas <i>et al.</i> (2005), Ippolito (2015)	Tratamento de efluentes
Hoppen <i>et al.</i> (2005), Huang <i>et al.</i> (2005) Oliveira e Holanda (2008).	Materiais para construção civil

As alternativas à simples disposição final diminuem o impacto ambiental pela redução do resíduo a ser descartado. Além disso, podem trazer outras vantagens, como a recuperação de áreas degradadas e ganho de eficiência no tratamento de efluentes, conforme relatam alguns dos estudos citados na Tabela 3.5, devendo ser preferidas em relação aos simples descartes do mesmo.

3.5. ETA BRASÍLIA

A Estação de Tratamento Brasília – ETA Brasília faz parte do Sistema de Distribuição Torto/Santa Maria e, segundo a ADASA, é responsável por atender 21,1% da população do Distrito Federal, especificamente das seguintes regiões administrativas: Asa Sul, Asa Norte, Cruzeiro, Sudoeste, Octogonal, Guará, Lago Sul e Jardim Botânico.

A água aduzida à ETA Brasília tem como origem três diferentes mananciais, que são: o Reservatório Santa Maria e o Ribeirão do Torto, adotados desde o início da operação dessa ETA e o Ribeirão Bananal, inserido no Sistema em 2017, devido à crise hídrica que afetou o Distrito Federal.

O processo de tratamento de água na ETA Brasília, descrito na Figura 3.9, inicia-se com a chegada da água bruta dos mananciais em uma câmara onde as contribuições de cada manancial são misturadas e encaminhadas ao pré-tratamento, após receber a adição de cal

como alcalinizante. O pré-tratamento tem origem na unidade de mistura rápida mediante o processo de Coagulação com uso do coagulante Policloreto de Alumínio (PAC), passando em seguida pela etapa de Floculação, onde ocorre a formação dos flocos, e pela flotação por ar dissolvido, onde os mesmos são removidos. O tratamento final se dá pela filtração rápida descendente nos 24 filtros contidos na ETA. Por fim, a água filtrada é encaminhada ao tanque de contato, onde recebe produtos químicos a fim de adequá-las aos padrões de potabilidade, sendo eles o Cloro, Flúor e Cal.

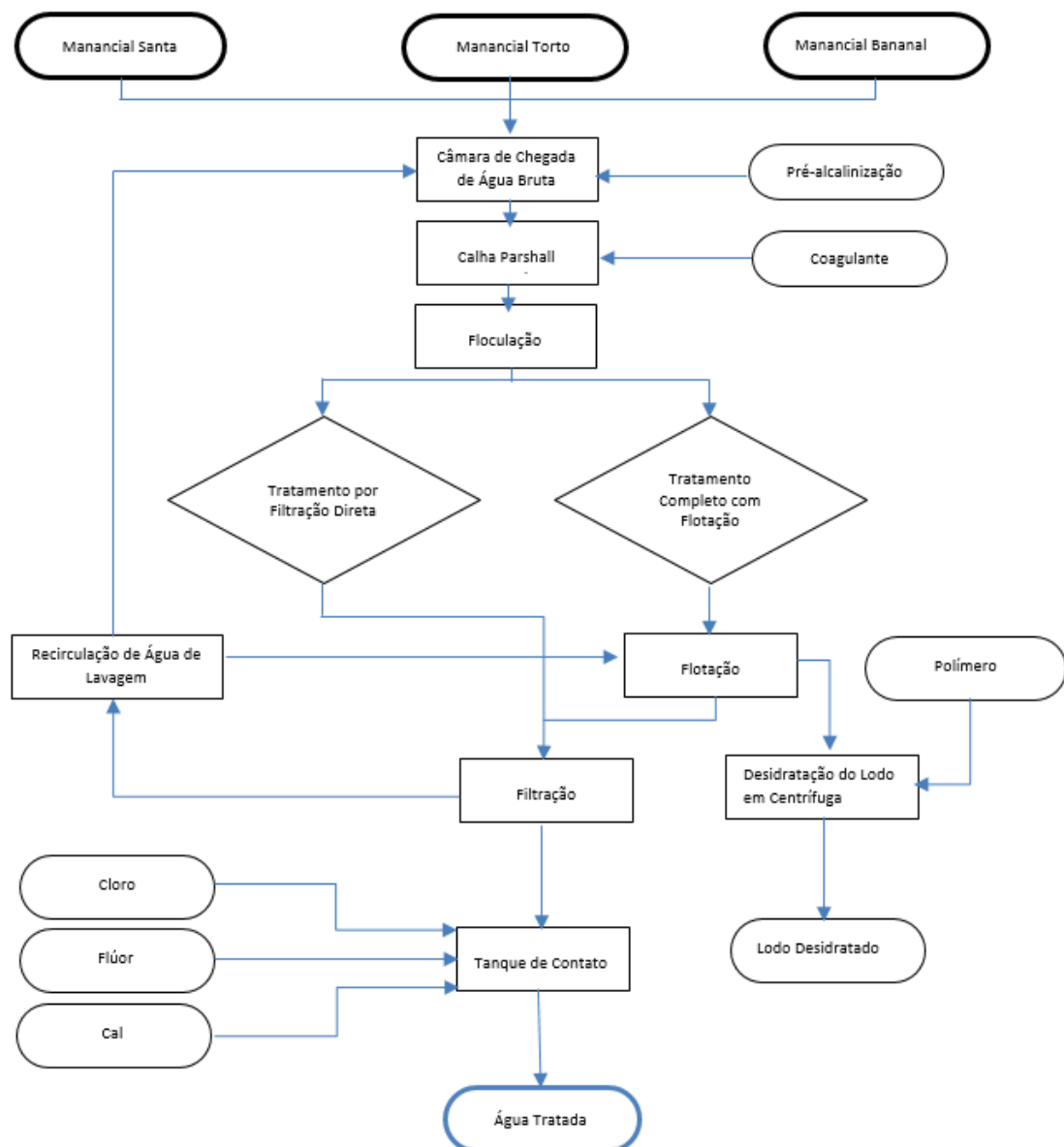


Figura 3.9 – Fluxograma de processos da ETA Brasília (Caesb, 2011)

A tecnologia de flotação, especificamente a flotação por ar dissolvido é o processo mais indicado para o tratamento de água bruta com a presença de grande quantidade de algas, cor verdadeira elevada e baixa turbidez (Di Bernardo *et al.*, 2012; Edzwald, 2010). Nesses casos, esse processo apresenta vantagens sobre o sistema de decantação por gravidade, pois facilita a remoção de flocos leves após a coagulação e floculação. Essas características levaram, portanto, à atual tecnologia da ETA Brasília (tratamento por ciclo completo com flotação por ar dissolvido), garantindo a segurança hídrica da água produzida.

A ETA Brasília é dotada de oito flotadores, dispostos em quatro unidades para o bloco ímpar e quatro para o bloco par, como pode ser visto na Figura 3.10, junto com as demais unidades da estação. Cada unidade de flotação possui área em planta de 12,5m x 8,0m com uma profundidade média de 3,30m. A taxa de flotação de projeto é de 300m³/m². dia e o tempo aproximado de detenção médio alcançado no processo de flotação é de cerca de 15 minutos, demonstrando a sua vantagem em relação aos sedimentadores por gravidade, caracterizados por taxas de clarificação muito inferiores e tempos de detenção prolongados.

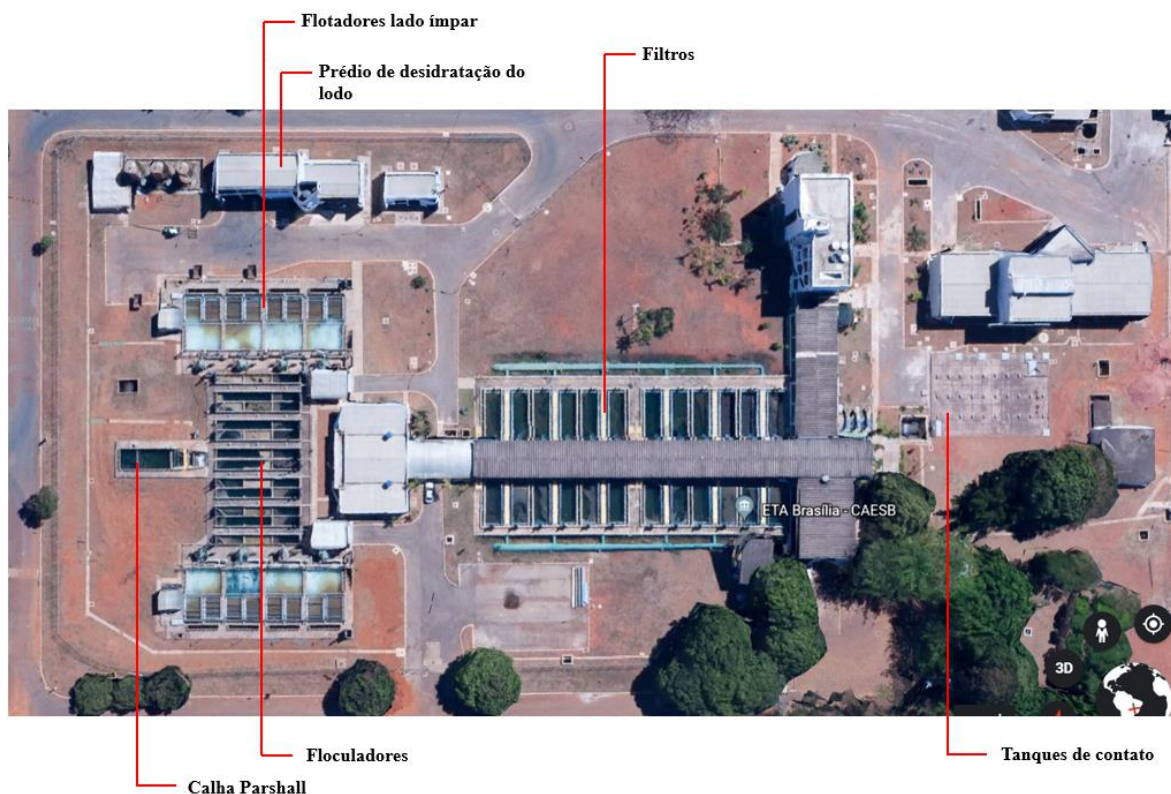


Figura 3.10 - Visão geral das unidades de tratamento da ETA Brasília (Google Earth, 2017)

Cada unidade de flotação (Figura 3.11) possui sistema de reciclo de água e pressurização de ar, constituídos basicamente por um tanque de saturação, um sistema de descompressão e por uma bomba de reciclo, que possibilita de maneira fácil e precisa, o ajuste da vazão de reciclo que chega ao tanque de saturação à pressão de saturação desejada.

No tanque de saturação é utilizada água clarificada em conjunto com ar comprimido fornecido por dois compressores rotativos de alta pressão e armazenados em dois tanques pulmão. O sistema de descompressão da água saturada é constituído por difusores dotados de bocais injetores com orifícios calibrados para realizar turbulência na alimentação e promover a geração de microbolhas de ar.

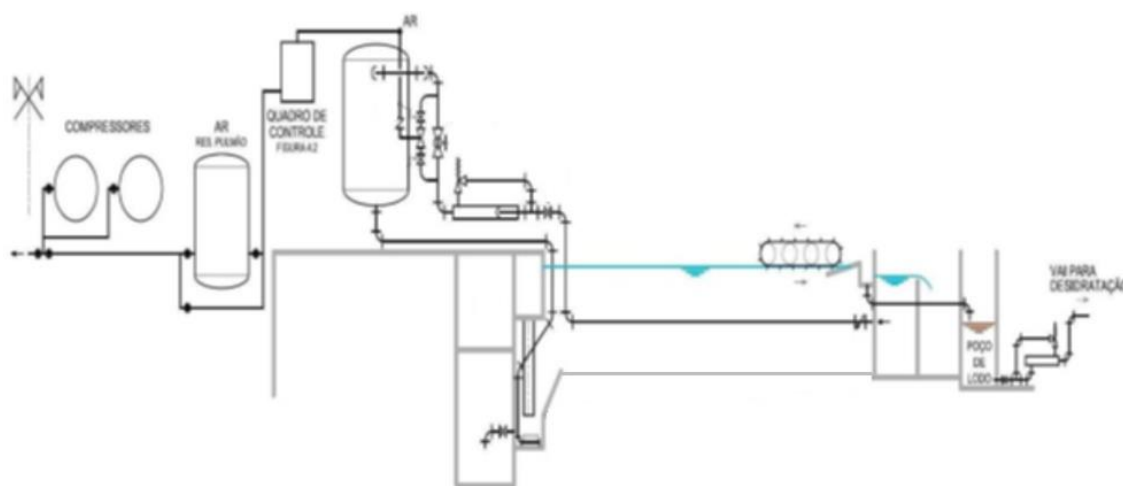


Figura 3.11 – Corte esquemático de uma unidade de flotação da ETA Brasília (Adaptado de Caesb, 2011)

3.5.1. Manejo do lodo flotado na Estação de Tratamento de Água Brasília

O lodo flotado é arrastado em direção a saída da unidade pela ação do fluxo da água, onde são removidos mecanicamente por raspadores superficiais até uma canaleta lateral, e transportados até o tanque de acúmulo por roscas sem fim, que operam durante 1 minuto ininterruptamente a cada 10 minutos, valor que pode ser alterado de acordo com as necessidades do tratamento.

Cada conjunto de 4 flotadores e um tanque de acumulação corresponde a um lado do sistema, denominado par ou ímpar. Posteriormente, o lodo acumulado nos tanques é bombeado para

o sistema de desidratação até as centrífugas, de número 1 e 2, por até quatro bombas de lodo, duas por tanque, onde recebem a adição de polímero aniônico de alto peso molecular para auxiliar na coagulação e aumentar a eficiência do processo de desidratação. A Figura 3.12 traz a descrição completa do sistema de desidratação do lodo.

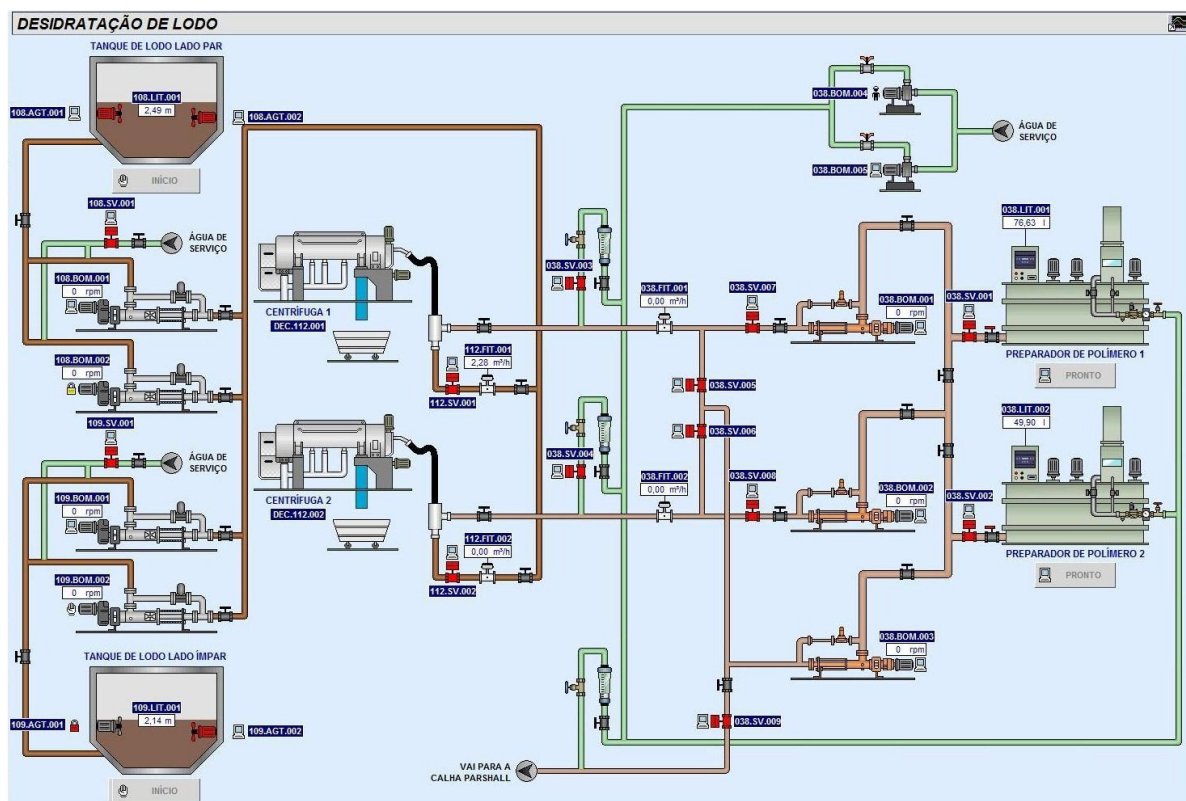


Figura 3.12 - Tela do supervisor do sistema de desidratação de lodo da ETA Brasília (Adaptado de Caesb, 2011)

Os lados par e ímpar do sistema de desidratação de lodo podem operar em paralelo, onde cada uma das centrífugas recebe o lodo gerado e acumulado em cada um dos lados ou como um sistema único, onde o lodo acumulado nos dois tanques é reunido pouco antes de ser distribuído para as centrífugas. É muito comum também que essa junção ocorra para abastecer somente uma centrífuga, a depender da vazão de lodo que está sendo desidratada.

A quantidade de lodo gerado nos flotadores, função da vazão e das características da água bruta, permite variações no arranjo operacional das centrífugas (Caesb, 2011):

- Situação de maior geração de lodo: utilização das quatro bombas de lodo e as duas centrífugas por um período diário de 16 horas;
- Situação mais frequente de operação: utilização de duas bombas de lodo, uma centrífuga por um período diário de 12 horas;

- c) Situação de maior vazão no médio prazo em função da vazão máxima da captação e da operação atual das elevatórias do Torto, Santa Maria e Bananal com a pior qualidade da água: utilização de duas bombas de lodo e duas centrífugas por um período diário de 13 horas;
- d) Situação em vazão máxima nas captações e água de excelente qualidade; será necessária a utilização de duas bombas de lodo e apenas uma centrífuga por um período inferior a 12 horas.

As centrífugas utilizadas para a desidratação do lodo são capazes de tratar até 10 m³/h de lodo gerado nos flotadores, se operadas individualmente. Para a operação em paralelo, é indicado pela fabricante que a soma da vazão de lodo afluyente a elas não seja maior do que 16 m³/h. Ainda de acordo com o fabricante, para que o teor de sólidos da torta na saída da centrífuga esteja na faixa de 20-25%, considerando características do lodo bruto com 50% de sólidos fixos, o teor de sólidos na alimentação deve estar compreendido entre 2-3%.

A fim de otimizar o processo de desidratação, as centrífugas permitem a regulagem dos parâmetros de operação. A Tabela 3.6 mostra os parâmetros ajustáveis e de que forma deve-se alterá-los a fim de aumentar o teor de sólidos da torta na saída da centrífuga, sendo o sinal “+” sinônimo de aumento do parâmetro e o sinal “-” de redução:

Tabela 3.6 - Parâmetros de operação da centrífuga da ETA Brasília

	Para aumentar a captura dos sólidos (clarificado melhor)	Para aumentar a concentração dos sólidos na substância seca
Velocidade do tambor	+	+
Velocidade diferencial rosca-tambor	-	-
Espessura do anel líquido	+	-
Vazão de alimentação do lodo	-	+
Vazão do flocculante	+	-

Após a centrifugação, o lodo desidratado é coletado em caçambas estacionárias de 5 m³ posicionadas abaixo da centrífuga. Quando completas, as caçambas são recolhidas por caminhão do tipo poliguindaste, transportadas e descarregadas em cascalheira desativada na

região do Sol Nascente, em Ceilândia/DF, para a recuperação da área degradada, como ilustrado na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Disposição do lodo desidratado da ETA Brasília em cascalheira desativada na região do Sol Nascente/DF

Por fim, ressalta-se que outros fatores externos à centrífuga podem contribuir no aumento de teor de sólidos final, além daqueles descritos na Tabela 3.6, o, como o tipo e dosagem dos polímeros que auxiliam na coagulação. Porém, na ETA Brasília, atualmente, só dois parâmetros são manipulados pela equipe de operação: vazão de alimentação e vazão do floculante (polímero), sendo este último regulado por tentativa e erro, a partir do resultado da análise de teor de sólidos.

Dessa forma, o presente estudo aplicou os métodos descritos no item 4 (Metodologia), para entender como os parâmetros de centrifugação influenciam no processo de desidratação, e, a partir dos resultados e análises obtidos, os fatores do processo de desidratação passem a ser manipulados de maneira adequada, contribuindo para a melhoria do processo de desidratação do lodo em escala real.

4. METODOLOGIA

A mistura dos mananciais que abastecem a Estação de Tratamento de Água Brasília (Lago Santa Maria, Ribeirões Torto e Bananal), que apresentam características distintas entre si, varia ao longo do ano, alternando suas contribuições percentuais para a vazão de alimentação total, como exemplificado na Figura 4.1. Esse dinamismo interfere nas características da água bruta, na dosagem dos produtos químicos aplicados e, conseqüentemente, na composição do lodo gerado na etapa de flotação por ar dissolvido. O processo de desidratação, porém, é operado mantendo-se constante a maior parte de seus parâmetros, como é o caso do tipo de polímero aplicado e a sua concentração.

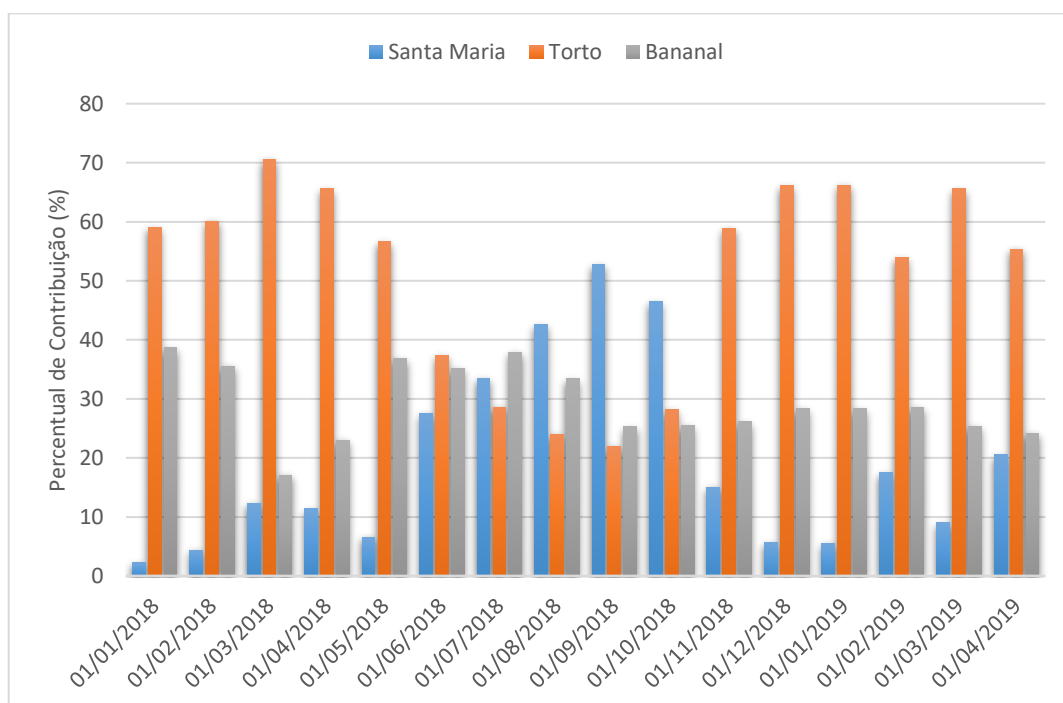


Figura 4.1 - Vazão e contribuição percentual dos mananciais que abasteceram a ETA Brasília - janeiro/2018 a abril/2019

Neste contexto, foram realizados ensaios em escala de bancada no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) da Universidade de Brasília, para analisar a influência na água bruta da predominância da contribuição do reservatório Santa Maria ou dos ribeirões Torto e Bananal na composição do lodo gerado nos flotadores da ETA. Para tal, obteve-se os dados do monitoramento realizado pela Companhia de Saneamento Ambiental de Brasília – CAESB, com relação à contribuição dos diferentes mananciais alimentando a ETA, as características da água bruta, a dosagem de coagulante e outros aspectos que podem

influenciar no teor de sólidos totais do lodo. Foram realizados também, ensaios de desidratação por centrifugação em escala de bancada. A Figura 4.2 resume as etapas metodológicas do trabalho.

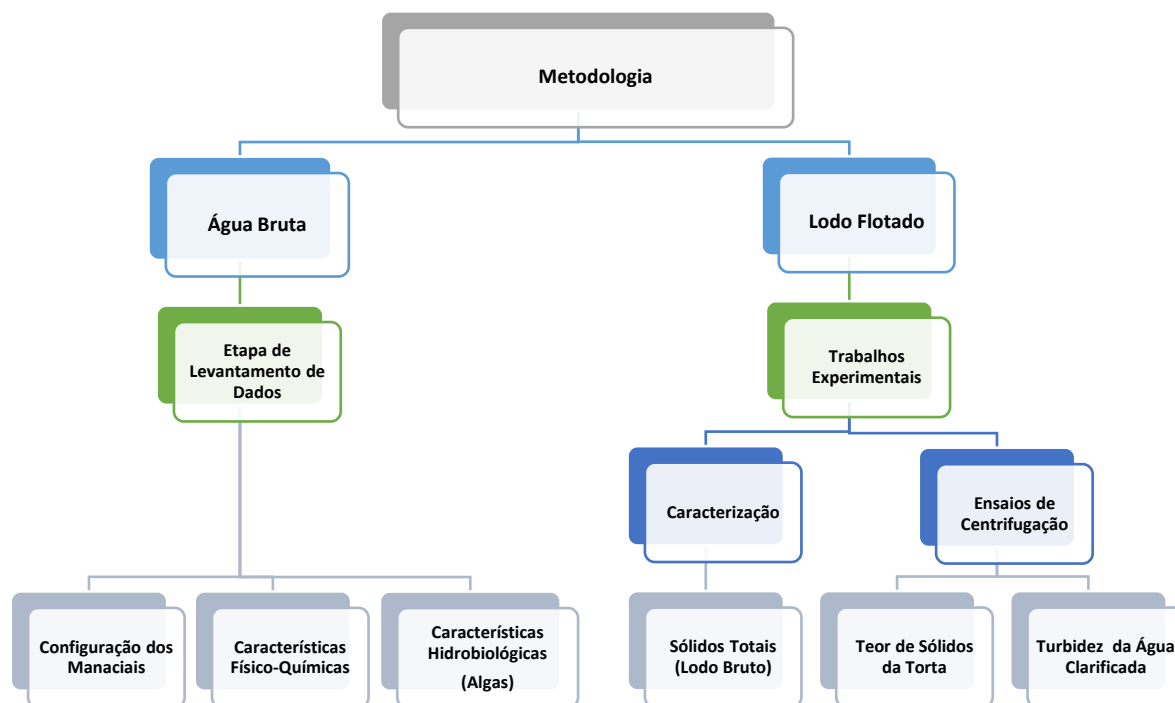


Figura 4.2 - Etapas metodológicas do trabalho

4.1. LEVANTAMENTO DE DADOS

O levantamento de dados consistiu na obtenção de informações confiáveis sobre as variáveis do tratamento e as características físico-químicas e biológicas da água bruta que deram origem ao lodo gerado e coletado nos flotaadores para a realização dos trabalhos experimentais.

Os parâmetros físico-químicos e biológicos da água afluyente à ETA Brasília, da água efluente de cada etapa e da água tratada que vai para os reservatórios de distribuição ao fim do tratamento, são quantificados periodicamente pela Caesb e armazenados no sistema interno da Companhia. Dentre esses parâmetros, a turbidez e o pH são analisados em todas as etapas do tratamento a cada hora no laboratório presente na própria estação e foram obtidos diretamente com os técnicos que realizam os procedimentos.

As análises de outros parâmetros são específicas de algumas etapas, como a densidade de coliformes totais, realizada apenas na água bruta e na água tratada e a análise de concentração residual de alumínio, apenas ao final do tratamento, sendo essas análises realizadas também no laboratório da própria estação, geralmente com periodicidade de uma e duas vezes ao dia, respectivamente. Esses, porém, não foram alvos do presente trabalho.

Já a presença de algas na água bruta, que foi de grande importância neste estudo, é analisada mensalmente pelo Laboratório Central da Caesb – PHI, localizado nos arredores da ETA Brasília. Por esses motivos, a obtenção desses dados foi intermediada pelos gestores da Estação de Tratamento de Água Brasília, que possuem acesso aos resultados.

Por fim, o levantamento dos dados das condições de operação foi obtido diretamente com os operadores da ETA Brasília. Dentre elas, têm-se a contribuição de cada manancial, definida de forma estratégica pelos gestores da Companhia, levando em conta aspectos técnicos, como o nível dos mananciais e qualidade da água bruta de cada um deles, e a dosagem do coagulante, definida com base na experiência dos operadores, porém muitas vezes auxiliada por ensaios em escala de bancada.

A contribuição dos mananciais e, conseqüentemente, a dosagem do coagulante podem apresentar variações ao longo de um mesmo dia. Dessa forma, a contribuição de cada manancial na água bruta total foi acertada previamente com os responsáveis técnicos da Estação, de forma que o levantamento dessas informações e a coleta dos dados dos parâmetros físico-químicos corresponderam exatamente ao lodo bruto na saída da rosca sem fim e às características da água bruta afluyente na estação que originou as amostras coletas de lodo.

Para tal, levou-se em consideração os tempos de adução da água bruta até a ETA Brasília (duas horas, em média), o tempo de detenção dos floculadores e flotadores (17 e 15 minutos, em média), levando em conta também o tempo para a remoção total da água que já estava nas unidades, de forma que o percentual de contribuição dos mananciais foi mantido constante por no mínimo 5 horas.

4.2. TRABALHOS EXPERIMENTAIS

4.2.1. Caracterização do lodo flotado

Como mencionado por Pan *et al.* (1998), os resíduos provenientes de mananciais com a presença significativa de algas apresentam maior dificuldade no processo de desidratação, enquanto a presença predominante de materiais minerais, está relacionada à melhor eficiência do processo. A partir dos estudos realizados por Guimarães (2007) e das análises de rotina realizadas pela Caesb, já são conhecida as características típicas dos mananciais Ribeirões e Torto e Bananal, principalmente mineral, e do reservatório Santa Maria (sólidos de natureza orgânica). Diante disso, os ensaios preliminares consistiram apenas em caracterizar o lodo flotado quanto ao parâmetro sólidos totais, apresentado na Tabela 4.1 para que fosse possível calcular o teor de sólidos final do lodo desidratado.

Tabela 4.1 - Métodos e equipamentos utilizados nos ensaios de caracterização do lodo bruto

Parâmetro	Método; Equipamento.
Sólidos Totais	Gravimétrico; Balança Analítica, estufa

A importância da análise dos sólidos totais está relacionada também ao atendimento dos requisitos relativos ao teor de sólidos que o lodo flotado deve apresentar para ser submetido à desidratação pelas centrífugas da ETA Brasília. O teor de sólidos no lodo deve estar compreendido entre 2-3%, caso contrário, a centrífuga irá operar fora de suas condições ideais, fornecendo resultados abaixo do esperado.

4.2.2. Experimentos de centrifugação

Os ensaios de centrifugação foram realizados em escala de bancada utilizando a centrífuga de bancada Rotina 420, da marca *Hettich*. Este equipamento possui 4 compartimentos, onde podem ser inseridos até 2 tubos com capacidade de 50 mL, sendo possível efetuar até 8 ensaios de centrifugação simultaneamente. Além disso, a centrífuga de bancada permite ajustar a velocidade de rotação até o valor de 4000 rpm e configurar diferentes valores de tempo de centrifugação. O tempo de centrifugação empregado nos ensaios foi de 50 minutos, uma vez que Guimarães (2007) observou que esse tempo para o lodo da ETA Brasília era

satisfatório, uma vez que a operação da centrífuga por tempos adicionais não compensaria o ganho adicional obtido.

Dessa forma, procurou-se aplicar no ensaio condições semelhantes ao processo de desidratação por centrífugas na ETA Brasília. Para tal, é necessário que o principal parâmetro de escala do processo de centrifugação, a intensidade do campo gravitacional, denominado de G^* , seja comum à centrífuga de bancada e à centrífuga na escala real. Tal parâmetro indica quantas vezes a intensidade do campo centrífugo presente em um equipamento de centrifugação é maior que a intensidade do campo gravitacional. A partir do G^* da centrífuga utilizada na ETA Brasília, por meio da Equação 4.1, foi possível calcular a rotação que foi aplicada na centrífuga de bancada, de maneira a proporcionar condições semelhantes no ensaio de centrifugação.

$$G^* = 4,024 f^2 \cdot r$$

Equação 4-1 (Prosab, 1999; Di Bernardo *et al.*, 2012)

Onde:

G^* = intensidade do campo gravitacional;

f : frequência da centrífuga (rps);

r : raio da centrífuga (m).

Os valores para que a rotação da centrífuga em bancada operasse com o mesmo G^* das centrífugas da ETA Brasília foram bem próximos ao da escala real, uma vez que os raios das duas centrífugas tinham apenas 6 mm de diferença. Assim, a frequência das centrífugas de bancada foi de 3540, enquanto a da ETA opera com 3530 rpm.

Já os polímeros que foram utilizados no ensaio estão descritos na Tabela 4.2. Estes polímeros foram escolhidos por apresentarem diferentes cargas elétricas, serem usualmente aplicados na desidratação do lodo de ETAs e por serem fabricados pelos principais fornecedores da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Dentre as opções, destaca-se o polímero aniônico AN1, de alto peso molecular e baixa densidade de cargas. Esse polímero possui as mesmas características do polímero que era empregado na ETA Brasília no início deste trabalho, porém não estava promovendo resultados satisfatórios. Ressalta-se que o

mesmo polímero é utilizado em outras estações de tratamento do Distrito Federal, com mananciais de características distintas ao da ETA Brasília, apresentando melhores resultados.

Tabela 4.2 - Características dos polímeros aplicados nos ensaios de centrifugação

Polímero	Carga	Peso Molecular	Densidade de cargas
AN1	Aniônico	Alto	Baixa
AN2	Aniônico	Altíssimo	Média
AN3	Aniônico	Alto	Alta
N1	Não iônico	Alto	Baixíssima
CA1	Catiônico	Alto	Muito baixa
CA2	Catiônico	Alto	Média
CA3	Catiônico	Alto	Alto

Foram testadas também combinações entre os polímeros de alta densidade de carga com os demais polímeros de cargas opostas na eficiência da desidratação do lodo flotado. Ma *et al.* (2007) observaram em seus estudos que, apesar da combinação entre polímeros aniônicos e catiônicos promover bons resultados, o condicionamento com a mistura de polímeros não apresenta vantagens consideráveis na desidratação em relação ao condicionamento com apenas um deles, não sendo recomendado, salvo em situações específicas, por ainda representarem custos extras e dificuldades na operação.

Dessa forma, foi considerado que o cenário do estudo poderia constituir-se em uma dessas situações específicas, dada à natureza da operação da ETA Brasília, alimentada por três diferentes mananciais, com características distintas entre si e, portanto, que a análise da combinação entre polímeros era uma questão pertinente aos estudos.

Quanto à preparação da solução dos polímeros, esta seguiu as recomendações dos fornecedores dos materiais, principalmente quanto ao tempo de preparo feito por meio de mistura com agitação por um tempo mínimo de 1 hora e de validade da solução (48 horas para polímeros aniônicos e 5 horas para os catiônicos). Para preparar a solução foi utilizado agitador magnético da marca *Thelga*.

Os experimentos de centrifugação contemplaram 5 etapas: coleta e preservação, homogeneização, caracterização do lodo flotado, ensaios de centrifugação e obtenção dos resultados, descritas a seguir:

4.2.2.1. Coleta e preservação do lodo flotado

A coleta foi realizada na saída da rosca sem fim do lado ímpar da estação, por meio de coletor adaptado a partir de garrafa pet, como mostrado na Figura 4.3. Esse ponto de coleta garante que as amostras coletadas de lodo correspondam exatamente à contribuição dos mananciais planejada, uma vez que a amostra não se mistura com o lodo contido nos tanques de acumulação e gerados previamente ao cenário de alimentação escolhido. As amostras que não foram utilizadas imediatamente, foram preservadas em refrigeradores para garantir a manutenção de suas características.

Essa etapa contou com a grande colaboração dos operadores da ETA Brasília. Uma vez que a rosca transportadora representa um potencial risco de acidentes de trabalho, era necessário que eles a paralisassem e ativassem por diversas vezes para que fosse feita a coleta do volume necessário para a realização dos experimentos.



(a)



(b)

Figura 4.3 – Coletor adaptado (a). Final da rosca sem fim (b)

4.2.2.2 – Homogeneização

A homogeneização foi uma etapa importante para expulsar o ar das amostras e conferir a uniformidade a todo o lodo que foi utilizado nos ensaios, uma vez que as partículas em suspensão tendem a sedimentar ou flotar com o avanço do tempo. Nos experimentos, a agitação foi realizada por meio de agitador mecânico com controlador de rotação, sendo esta mantida em valores moderados, apenas com a função de mistura, após a observação de que o ar já havia sido retirado das amostras.

4.2.2.3. Caracterização do lodo flotado

Paralelamente a essas etapas, foi realizada a caracterização do lodo flotado, por meio da análise de teor de sólidos totais pelo método gravimétrico com o auxílio de uma estufa, conforme apresentado na Figura 4.2 e na Tabela 4.1. Essa etapa é importante, pois fornece os dados necessários para a quantificação do teor de sólidos totais do lodo desidratado, além de verificar a influência da variação desses valores no processo de desidratação.

4.2.2.4. Realização dos ensaios de centrifugação

Os ensaios de centrifugação propriamente ditos seguiram a seguinte rotina:

- Distribuição de amostras de lodo em tubos de centrifugação com 40ml de lodo em cada tubo de 50mL;
- Aplicação de polímero em dosagens variadas (geralmente entre 0 e 8 mL) e complemento com água destilada, de forma que todos os tubos tiveram o mesmo volume final;
- Agitação rápida do líquido nos tubos por 30 segundos em agitador mecânico adaptado para o ensaio (Figura 4.4), para mistura, seguida de agitação lenta por 1 minuto, para floculação, realizada manualmente com o uso de bastão de vidro (Figura 4.5);



Figura 4.4 - Agitador mecânico empregado para agitação rápida



Figura 4.5 - Processo manual de agitação lenta para floculação

4.2.2.5. Obtenção dos resultados

Ao final dos ensaios de centrifugação espera-se que a separação entre as fases líquida e sólida da amostra de lodo bruto fique nítida. Com o auxílio de uma proveta graduada de 50 ml, foi transferido e lido o volume de sobrenadante resultante na amostra. Com o volume da água clarificada e o teor sólidos totais no lodo flotado (bruto), obtida nos ensaios de caracterização, foi possível estimar o teor sólidos totais no fundo de cada tubo de centrifugação utilizado, por balanço de massa por meio da Equação 4.2.

$$St = Si \times \frac{Vf}{Vi}$$

Equação 4-2

Onde:

St = Concentração de sólidos totais no lodo desidratado (mg/l);

Si = Concentração de sólidos totais inicial (mg/l) – medido nos ensaios de caracterização;

Vf = Volume do líquido clarificado (ml);

Vi = Volume da amostra.

Outro parâmetro utilizado como indicador da eficiência do processo de desidratação por centrífugas foi a turbidez da água clarificada, realizada pelo método nefelométrico com equipamento da marca *HACH*, capaz de ler amostras que possuam até 10.000 UT.

4.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos de centrifugação foram divididos em duas etapas, conforme apresentado na Tabelas 4.3. A primeira etapa se refere aos experimentos realizados com o objetivo de definir o polímero mais adequado para a desidratação em escala real na ETA Brasília, considerando a necessidade de variação do polímero ou ainda a mistura entre polímeros de diferentes cargas, de acordo com os lodos gerados a partir da contribuição predominante do reservatório Santa Maria (SM) ou dos ribeirões Torto e Bananal (TB) na água bruta afluyente à ETA. Os experimentos da Etapa II visaram a adequação de outros parâmetros para a desidratação do lodo flotado, a citar dosagem e concentração do polímero e o fator de intensidade do campo gravitacional (G^*).

Tabela 4.3 - Relação dos experimentos realizados neste estudo

Etapa	Experimento	Contribuição (%)		Número de polímeros testados	Concentração do Polímero (%)	G*	Faixa dosagem do polímero (g/L)
		Santa Maria (SM)	Torto e Bananal (TB)				
I	1.1	100	0	7	0,2	2465	0-0,4
	1.2	30	70	7	0,2		0-0,4
	2.1	75	25	7	0,2		0-0,4
	2.2	55	45	7	0,2		0-0,4
	3	75	25	6	0,2		0-0,2
II	4	70	30	7	0,5	2465	0-1
	5	75	25	7	0,3	787	0-0,3
	6	75	25	1	0,05-0,6	2465	0-0,4
	Extra	-	-	1	0,2	2465	0-0,4

Para não haver dúvidas entre os conceitos dos parâmetros dosagem e concentração do polímero, neste estudo, considerou-se a concentração do polímero como a concentração da solução do polímero, sendo expressa pela porcentagem da massa polímero em relação ao volume de água utilizado para prepará-la. Já a dosagem diz respeito à massa de polímero em relação ao volume de lodo das amostras, expressos em gramas de polímero por litro de lodo.

Na Tabela 4.3 também são apresentados os parâmetros de centrifugação aplicados em cada um dos experimentos. A variação nos diversos valores e faixas desses parâmetros permitiu analisar a influência em escala de bancada que cada um deles exerce na desidratação do lodo flotado e gerado na ETA Brasília. Os resultados obtidos e suas respectivas discussões serão abordadas no item 5 (Resultados e Discussões).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 5.1, apresentada a seguir, e 5.5, apresentada mais adiante, são apresentados novamente os experimentos de centrifugação do lodo flotado concretizados na elaboração deste trabalho e que serão discutidos neste Capítulo, bem como alguns dos parâmetros determinados durante a realização dos ensaios.

Tabela 5.1 - Relação dos experimentos realizados na Etapa I

Etapa	Experimento	Contribuição (%)		Número de polímeros testados	Concentração do Polímero (%)	G*	Faixa dosagem do polímero (g/L)
		Santa Maria (SM)	Torto e Bananal (TB)				
I	1.1	100	0	7	0,2	2465	0-0,4
	1.2	30	70	7	0,2		0-0,4
	2.1	75	25	7	0,2		0-0,4
	2.2	55	45	7	0,2		0-0,4
	3	75	25	6	0,2		0-0,2

Na Etapa I, foram realizados 5 ensaios no total e, para todos eles, foram testados ao menos 6 polímeros. Foram também realizados ensaios de centrifugação do lodo flotado sem a aplicação de polímero (controle) para avaliar a influência do uso de polímero na eficiência da desidratação. O peso molecular dos polímeros variou de alto a muito alto, enquanto a densidade de cargas alternou entre baixa, média e alta para os tipos de carga aniônico e catiônico. Nos Experimentos 1 e 2 foi testado ainda um único polímero não iônico.

5.1. ETAPA I – EXPERIMENTOS PARA ADEQUAÇÃO DO POLÍMERO

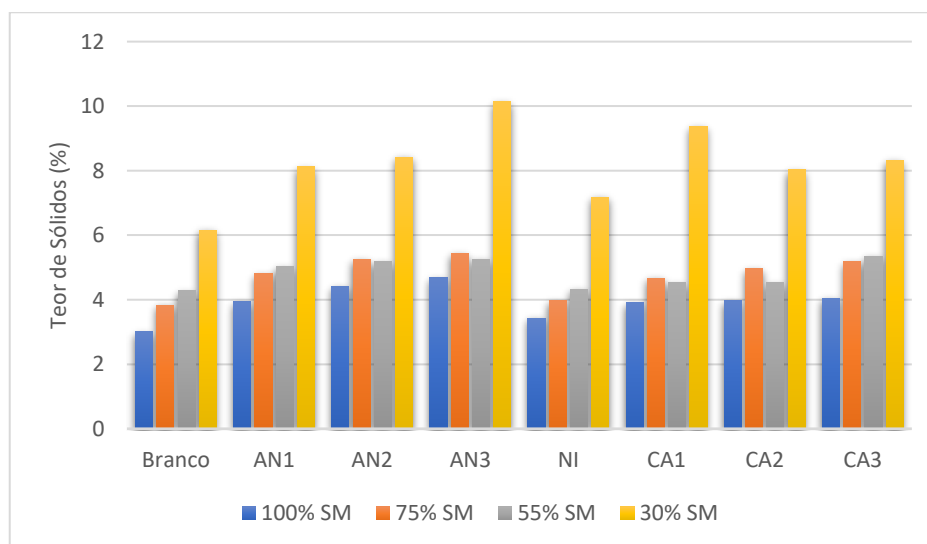
5.1.1. Influência dos mananciais na desidratação do lodo

Uma das hipóteses levantadas para a baixa desidratabilidade do lodo da ETA Brasília foi que a contribuição do reservatório Santa Maria influenciava negativamente na desidratação do lodo flotado, devido ao teor de matéria orgânica conferido pela presença de algas nesse manancial. Os estudos de Guimarães (2007) realizados com a produção em escala piloto do

lodo gerado a partir do tratamento da água do reservatório Santa Maria já haviam sinalizado para essa situação. Pan *et al.* (1998) também constataram a alteração nas características de condicionamento e desidratação de lodos gerados a partir da água bruta com presença de algas.

Na Figura 5.1, é possível notar que esse comportamento se confirma, uma vez que todos os polímeros testados apresentaram teores de sólidos menores para maiores contribuições do manancial Santa Maria na água bruta afluyente à ETA, inclusive quando não houve aplicação de polímero (controle).

Vale destacar que os resultados de teor de sólidos da Figura 5.1 foram obtidos a partir da dosagem ótima obtida de cada um dos polímeros nos diferentes ensaios, apresentadas na Tabela 5.2, e que o polímero aniônico com alta densidade de carga (AN3) apresentou melhor resultado para a maioria das condições de contribuição de vazão do reservatório Santa Maria. As doses ótimas correspondem ao valor da dosagem para a qual o teor de sólidos do lodo desidratado apresentou o maior valor e, dessa forma, destaca-se também a predominância da dosagem de 0,1 g/L entre as dosagens ótimas dos polímeros testados, algo que será abordado ainda neste Capítulo.



AN1	Aniônico com baixa densidade de carga	CA1	Catiônico com baixa densidade de carga
AN2	Aniônico com densidade média de carga	CA2	Catiônico com densidade média de carga
AN3	Aniônico com alta densidade de carga	CA3	Catiônico com alta densidade de carga
NI		Não Iônico	

Figura 5.1 – Teor de sólidos da torta para diferentes contribuições do reservatório Santa Maria

Os resultados obtidos para as demais dosagens de polímeros nos Experimentos 1 e 2 estão representados nos Apêndice A e B.

Porém, apenas a pequena diferença de teor de sólidos em relação aos outros polímeros, próxima a 3% para a menor contribuição do Santa Maria e 1,25% para a maior contribuição deste manancial, não é suficiente para afirmar que o polímero AN3 é o mais adequado para a operação das centrífugas em escala real na ETA Brasília. A proximidade dos resultados coincide com a conclusão de Ayol *et al.* (2005) de que a carga do polímero não é um fator determinante na desidratação do lodo.

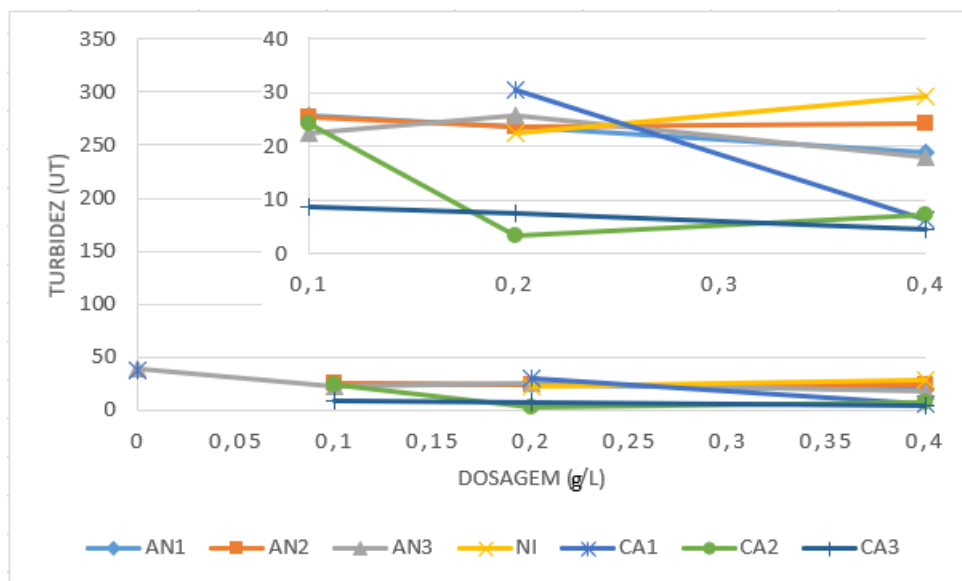
Tabela 5.2 - Dosagens ótimas de polímeros para os experimentos da Etapa I

Experimento	Polímeros													
	AN1		AN2		AN3		NI		CA1		CA2		CA3	
	D	TS (%)	D	TS (%)	D	TS (%)	D	TS (%)	D	TS (%)	D	TS (%)	D	TS (%)
1.1 (100% Santa Maria)	0,2	3,93	0,4	4,41	0,1	4,68	0,1	3,43	0,4	3,9	0,4	3,97	0,4	4,05
2.1 (75% Santa Maria)	0,1	4,8	0,1	5,26	0,1	5,44	0,1	3,96	0,1	4,66	0,1	4,96	0,1	5,18
2.2 (55% Santa Maria)	0,2	5,03	0,1	5,17	0,1	5,26	0,2	4,33	0,2	4,52	0,2	4,52	0,4	5,35
1.2 (30% Santa Maria)	0,1	8,12	0,1	8,42	0,2	10,14	0,1	7,18	0,4	9,38	0,2	8,03	0,1	8,33

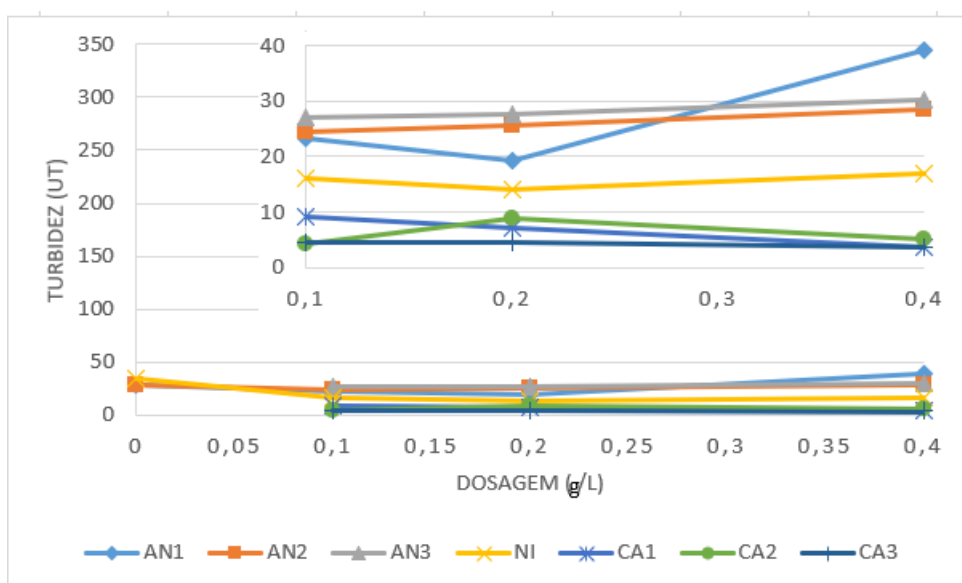
Legenda: D: dosagem ótima (g/L)

O outro parâmetro que deve ser levado em consideração para a tomada de decisão quanto ao polímero a ser aplicado no processo de desidratação do lodo é a turbidez do líquido clarificado produzido na centrifugação que, neste trabalho, apresentou comportamento mais expressivo que o teor de sólidos na avaliação da eficiência da desidratação do lodo flotado. Como pode ser visto nos gráficos da Figuras 5.2, os polímeros catiônicos foram os que forneceram os menores valores de turbidez no líquido clarificado, comportamento que se repetiu ao longo de todos os experimentos realizados. Resultado semelhante foi obtido por Ayol, Dentel e Fillibeli (2005) ao comparar a aplicação de polímero catiônico, não iônico e a combinação entre eles.

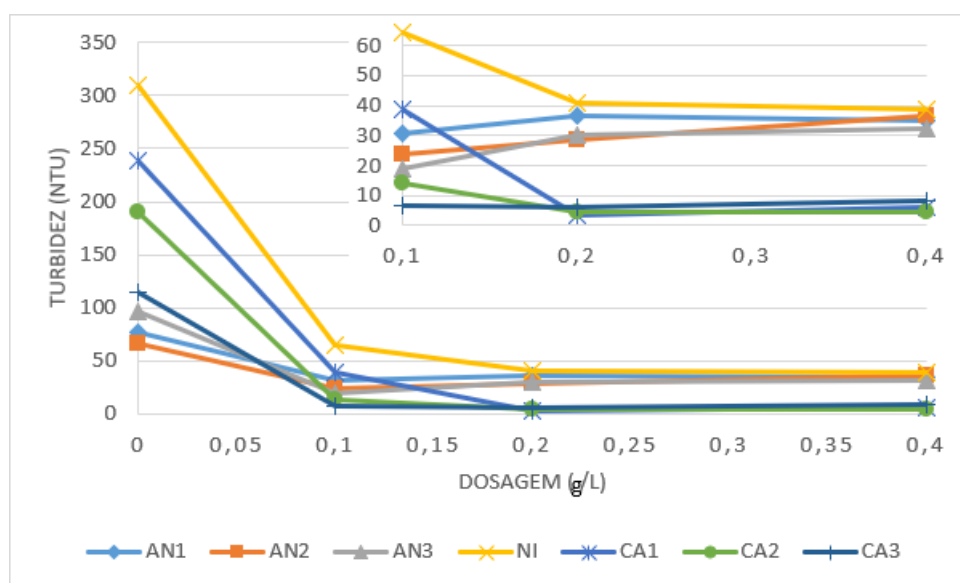
Em alguns casos foi possível notar o comportamento da turbidez do clarificado observado por Sun *et al.* (2015), onde a mesma se eleva com o aumento da dosagem do polímero, ação causada pela interação entre a carga positiva do PAC residual presente no lodo e a carga positiva dos polímeros catiônicos, produzindo repulsão eletrostática entre elas e levando ao desprendimento de algumas pequenas partícula dos flocos. Houve amostras, porém, que a dosagem não foi elevada o suficiente para que isso ocorresse e o valor da turbidez permaneceu praticamente constante ou ainda reduziu com o aumento da dosagem até o valor de 0,4 g/l.



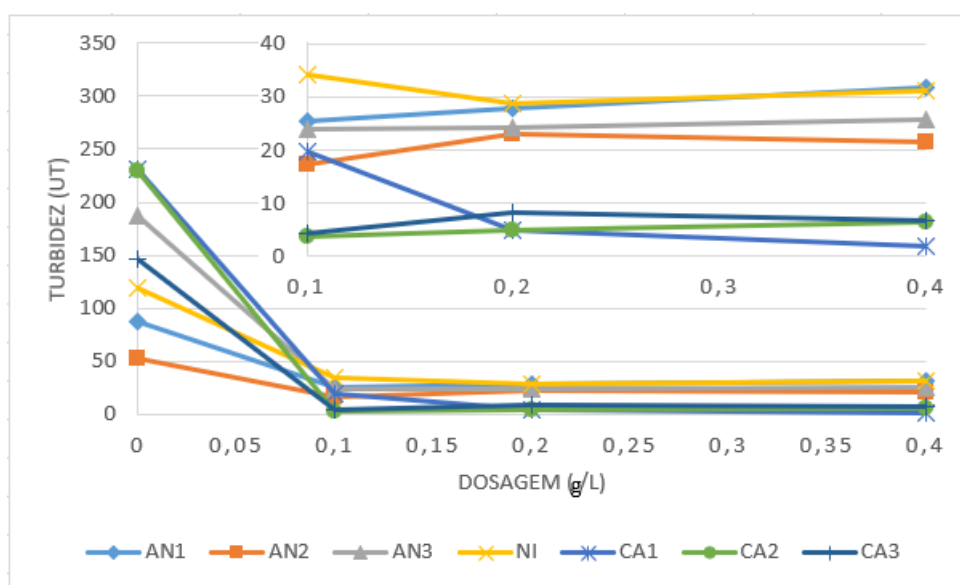
(a)



(b)



(c)



(d)

AN1	Aniônico com baixa densidade de carga	CA1	Catiônico com baixa densidade de carga
AN2	Aniônico com densidade média de carga	CA2	Catiônico com densidade média de carga
AN3	Aniônico com alta densidade de carga	CA3	Catiônico com alta densidade de carga
NI		Não Iônico	

Figura 5.2 – Comparação da turbidez do clarificado para diferentes polímeros, com diferentes contribuições do reservatório Santa Maria nos: (a) Experimento 1.1 (100% SM) (b) Experimento 1.2 (30% SM) (c) Experimento 2.1 (75% SM) e (d) Experimento 2.2 (55% SM)

Nas Figuras 5.2 (a) e (b), faltam alguns valores para a turbidez do clarificado, principalmente nas amostras de controle, onde não há dosagem de polímero. Isso aconteceu pois, nesses Experimentos, que foram os primeiros a serem realizados neste trabalho, o turbidímetro estava em configuração manual, apresentando apenas valores até 40 UT e esta situação só foi solucionada posteriormente, com o auxílio dos técnicos de laboratório.

Já nas Figuras 5.2 (c) e (d), foi possível notar, de forma mais clara, a discrepância nos valores de turbidez nas amostras em que não foram aplicadas dosagens de polímero. Essa situação foi notada durante a realização dos ensaios, e observou-se que, a medida em que o experimento se desenvolvia, os valores de turbidez do líquido clarificado das amostras controle do lodo flotado. Formulou-se duas hipóteses para tal comportamento, a primeira de que a agitação não estava sendo suficiente para homogeneizar a amostra e os sólidos estavam se concentrando na porção inferior e, a segunda, que a agitação estava sendo tão intensa de tal forma que os flocos originalmente presentes no lodo flotado estavam sendo desfeitos.

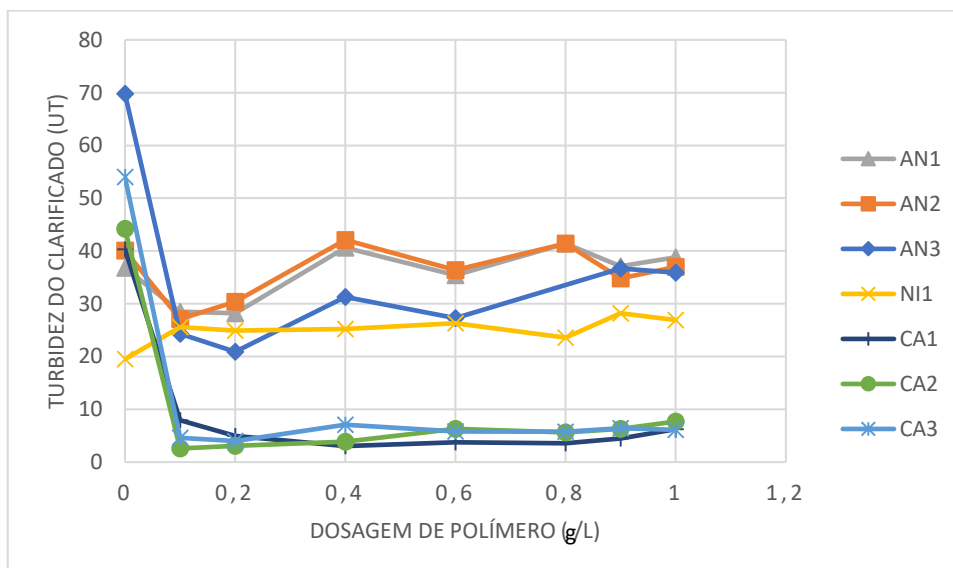
Com o objetivo de identificar o motivo do incremento da turbidez nas amostras em branco ao longo dos experimentos, procedeu-se à realização de ensaios de teor de sólidos totais do lodo flotado não somente no início dos experimentos, mas também durante a sua realização, sendo que os resultados obtidos foram semelhantes em todas as análises. Dessa forma, a hipótese que a agitação intensa causava a desagregação dos flocos e, conseqüentemente, o aumento da turbidez da amostra sem polímero ao longo da realização dos experimentos de centrifugação, parece ser a mais plausível.

Importante notar, contudo, a eficiência do condicionamento com polímeros na captura dos sólidos, uma vez que, a partir da aplicação dos polímeros no lodo, houve redução significativa da turbidez do líquido clarificado, mesmo com a interferência da agitação na desagregação dos flocos. A melhora significativa da qualidade do clarificado já havia sido prevista neste estudo com base nas informações da AWWA (1996), indicando o aumento da eficiência do processo de centrifugação.

Há que se ressaltar, porém, que a maior retenção dos sólidos suspensos na água pelos polímeros catiônicos, indicadas pelo parâmetro da turbidez residual do líquido clarificado não correspondeu ao maiores valores de teor de sólidos no lodo desidratado obtido pelo polímero aniônico de alta densidade de carga. Assim, atribui-se os valores mais elevados de

turbidez para os polímeros aniônicos à presença partículas coloidais no clarificado, já que essas não causam interferência significativa no teor de sólidos totais da torta, mas refletem no parâmetro de turbidez do líquido efluente.

Nos ensaios seguintes, a interferência da agitação foi minimizada e os valores da turbidez do líquido clarificado efluente à centrífuga passaram a ser mais próximos, como mostra a Figura 5.3, referente ao experimento de número 4, onde as amostras de lodo flotado foram obtidas a partir da contribuição de 70% do reservatório Santa Maria na água bruta afluyente à ETA Brasília.



AN1	Aniônico com baixa densidade de carga	CA1	Catiônico com baixa densidade de carga
AN2	Aniônico com densidade média de carga	CA2	Catiônico com densidade média de carga
AN3	Aniônico com alta densidade de carga	CA3	Catiônico com alta densidade de carga
NI		Não Iônico	

Figura 5.3 - Comparação da turbidez do clarificado para diferentes polímeros no Experimento 4 (70% Santa Maria)

Novamente, observa-se a grande influência que a aplicação de polímeros tem sobre a turbidez do líquido clarificado. Com exceção, no Experimento 4 (70% Santa Maria), da aplicação do polímero não iônico, a aplicação dos outros polímeros foi determinante para que os valores de turbidez das amostras fossem reduzidos a partir da aplicação da mínima dosagem, que neste experimento foi de 0,1 g/l, com destaque ainda para as três variações dos polímeros catiônicos, de baixa, média e alta densidade de carga.

5.1.2. Características da Água Bruta

Através do monitoramento periódico realizado pela Caesb, foram obtidos os valores dos parâmetros físico-químicos e biológicos da água bruta afluyente à ETA, apresentados na Tabela 5.3, conforme a etapa de levantamento de dados da metodologia adotada e apresentada na Figura 4.2. As análises desses parâmetros realizadas simultaneamente à realização dos Experimentos 1 e 2.

Tabela 5.3 - Caracterização da água bruta para os Experimentos 1.1 (100% SM), 1.2 (30% SM), 2.1 (75% SM) e 2.2 (55% SM)

Experimento	Contribuição		Água Bruta				
	Santa Maria (SM)	Torto e Bananal (TB)	pH	Cor	Turbidez	Algas (Ind/L)	PAC (mg/l)
1.1	100	0	6,5	11	1,49	1,49x10 ⁵	3,0
1.2	30	70	6,3	7	1,36		3,0
2.1	75	25	6,8	6	1,21		3,0
2.2	55	45	6,7	9	1,61		2,5

Como é possível notar na Tabela 5.3, ainda que a contribuição percentual dos mananciais que alimentam a ETA Brasília tenham variado acentuadamente ao longo dos 4 experimentos citados, os valores dos parâmetros físico-químicos, analisados em intervalos de 1 hora pelo laboratório da ETA, se mantiveram quase que inalterados nos diferentes cenários, indicando a baixa influência que esses representam na composição do lodo. A concentração de algas é o único dos parâmetro medido mensalmente e, portanto, o valor foi o mesmo para todos os experimentos.

Porém, como já se tem conhecimento prévio do teor de matéria orgânica no reservatório Santa Maria conferido pela presença de algas e das características mineiras dos ribeirões Torto e Bananal, através dos estudos realizados por Guimarães (2007), além do monitoramento periódico realizado pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal, atribui-se a esse parâmetro às diferenças encontradas na eficiência da desidratação em escala de bancada.

Dessa forma, optou-se por priorizar a realização dos experimentos e análises dos resultados para os ensaios com os diferentes polímeros em relação às análises dos parâmetros físico-químicos no prosseguimento dos estudos. No entanto, ao término dos Experimentos os parâmetros físico-químicos foram novamente objetos de análises, observando novamente o comportamento homogêneo das características físico-químicas analisadas em diferentes cenários de alimentação da ETA, como pode ser visto nas tabelas do Apêndice C (Experimento 3, 75% SM), Apêndice D (Experimentos 4 e 5, 70% SM e 75% SM, respectivamente) e Apêndice E (Experimento 6, 75% SM).

5.1.3. Combinação de Polímeros

Como proposto na metodologia, foi também avaliada a combinação entre alguns polímeros com diferentes características na eficiência da desidratação do lodo gerado nos flotadores da ETA Brasília, devido à contribuição conjunta que mananciais com diferentes características fornecem à água bruta afluyente na ETA.

Os experimentos com mistura de polímeros tiveram como base os polímeros de alta densidade de cargas para os diferentes tipos de cargas, ou seja, os polímeros AN3 e CA3. Estes polímeros foram combinados entre si, e depois combinados com os demais polímeros de cargas opostas a cada um deles e diferentes densidades de cargas, como representado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Mistura de polímeros avaliadas no Experimento 3, com 75% de contribuição do Santa Maria e 25% dos ribeirões Torto e Bananal

Polímero Base		Combinação		Concentração da Solução (%)
Polímero	Contribuição (%)	Polímero	Contribuição (%)	
AN3	100%	-	-	0,2
AN3	50%	CA1	50%	0,2
AN3	50%	CA2	50%	0,2
AN3	50%	CA3	50%	0,2
CA3	100%	-	-	0,2
CA3	50%	AN2	50%	0,2
CA3	50%	AN1	50%	0,2

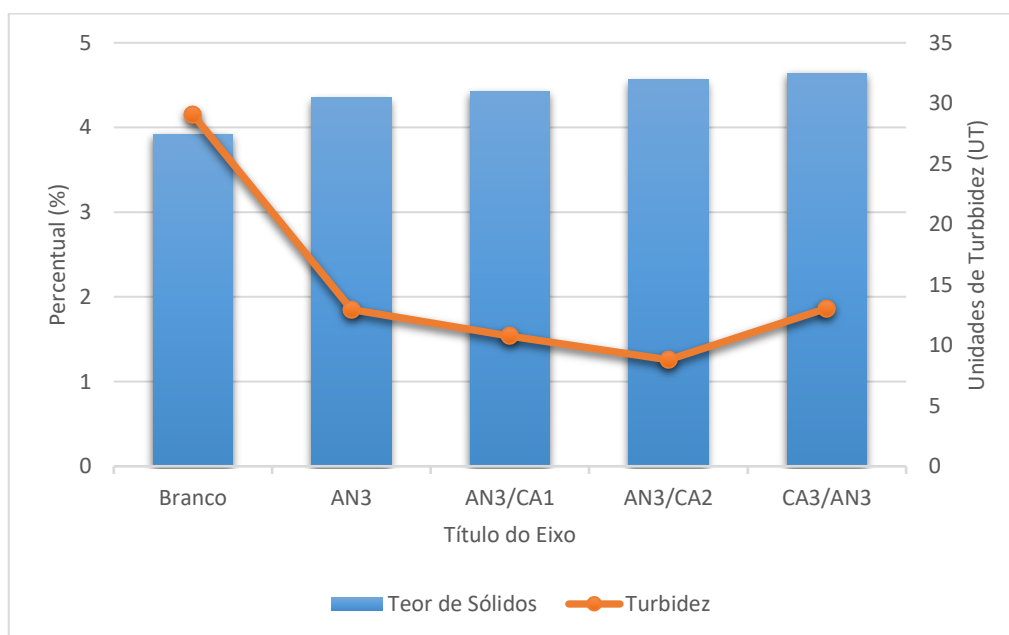
Ainda na preparação, foram observados alguns possíveis problemas operacionais para a aplicação de misturas em escala real, pois a combinação de polímeros com diferentes cargas

fez com que eles reagissem entre si e essa reação resultou na formação de grumos, como pode ser visto na Figura 5.4. Ainda assim, deu-se prosseguimento aos ensaios, uma vez que a solução sob a camada sólida apresentava viscosidade comum à dos outros polímeros preparados durante os trabalhos experimentais.

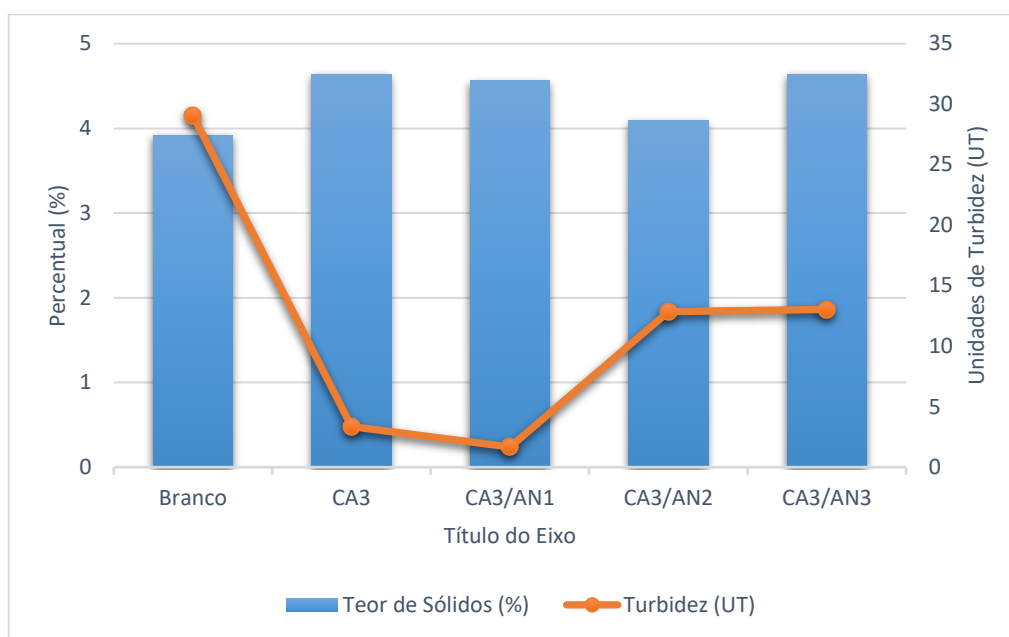


Figura 5.4 - Formação de grumos resultantes da reação entre polímeros de diferentes cargas

Os resultados dos ensaios utilizando-se mistura de polímeros estão representados na Figura 5.5.



(a)



(b)

Figura 5.5 - Resultados obtidos com a mistura de polímeros a partir da combinação de: (a) polímero aniônico de alta carga com polímeros catiônicos e (b) polímero catiônico de alta carga com polímeros aniônicos

A turbidez do efluente clarificado diminuiu em relação à aplicação de somente polímero aniônico e aumentou em relação à aplicação de polímero catiônico apenas, com exceção da mistura dos polímeros CA3 e AN1, onde a turbidez do clarificado representou o menor valor dentre todos, mas o teor de sólidos do lodo desidratado foi inferior em relação a outras opções. A mistura entre os polímeros AN3 e CA3 desidratou mais o lodo flotado, porém o valor não chegou a superar a aplicação apenas do polímero CA3, apresentando um clarificado de menor qualidade.

A mistura entre polímeros catiônicos e aniônicos, portanto, não forneceu resultados que justificassem a sua aplicação em escala real. Resultados semelhantes já haviam sido obtidos por Ma *et al.* (2007), que constataram que, apesar da combinação entre polímeros aniônicos e catiônicos apresentarem valores aceitáveis para teor de sólidos do lodo desidratado, o condicionamento com a mistura de polímeros não apresenta vantagens consideráveis na desidratação em relação ao condicionamento com apenas um deles, não sendo recomendado, salvo em situações específicas, por ainda representarem custos extras e dificuldades na operação.

Porém, devido ao problema experimental ocorrido, propõe-se para experimentos futuros a avaliação da combinação entre as soluções de polímeros preparadas separadamente ao invés da preparação conjunta e a ordem de aplicação que devem ser aplicadas as diferentes soluções. Apesar de atualmente essa ser uma opção inviável para a ETA Brasília, a obtenção de resultados positivos da combinação pode sugerir a mudança na etapa de preparação dos polímeros, de maneira a combinar a solução dos dois materiais que possuem características diferentes entre si.

5.2. ETAPA II – EXPERIMENTOS PARA ADEQUAÇÃO DOS DEMAIS PARÂMETROS

O fato de os ensaios não fornecerem resultados robustos o bastante para determinar o polímero que mais influencia a desidratação do lodo flotado, motivou a busca da avaliação da influência de alguns parâmetros dos ensaios, como a concentração e dosagem de polímero e o valor de G^* , mediante a execução dos ensaios apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Relação dos experimentos realizados na Etapa II

Etapa	Experimento	Contribuição (%)		Número de polímeros testados	Concentração do Polímero (%)	G^*	Faixa dosagem do polímero (g/l)
		Santa Maria (SM)	Torto e Bananal (TB)				
II	4	70	30	7	0,5	2465	0-1
	5	75	25	7	0,3	787	0-0,3
	6	75	25	1	0,05-0,6	2465	0-0,4
	Extra	-	-	1	0,2	2465	0-0,4

5.2.1. Influência da intensidade do campo gravitacional (G^*)

Em relação à intensidade do campo gravitacional, alterou-se acentuadamente o G^* da centrífuga de bancada por meio da alteração da velocidade, passando de 3540 rotações por minuto para 2000 rpm, uma vez que Reali *et al.* (1999) obtiveram em seus estudos diferenças menos notáveis para diferentes dosagens de um único polímero na desidratação do lodo,

quando empregaram velocidades de 3000 rpm, próximas a dos primeiros experimentos deste trabalho, comparadas a valores inferiores desse parâmetro. Dessa forma, a intensidade do campo gravitacional (G^*) foi reduzida de um valor máximo de 2465 para 790. Porém, o cenário se repetiu e, novamente os valores do teor de sólidos do lodo desidratado foram bem próximos uns aos outros para os diferentes polímeros, como pode ser visto na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Resultados da desidratação em centrífuga de bancada com rotação de 2000rpm

Polímero	Concentração do Polímero (mg/l)	Teor de sólidos inicial (%)	Teor de sólidos final (%)	Turbidez (UT)
Branco	0	1,45	3,13	231
AN1	0,3	1,45	3,09	32,8
AN2	0,3	1,45	3,46	32,2
AN3	0,3	1,45	3,28	44
NI	0,3	1,45	2,93	83,8
CA1	0,3	1,45	3,52	11,7
CA2	0,3	1,45	3,31	8,78
CA3	0,3	1,45	3,31	3,64

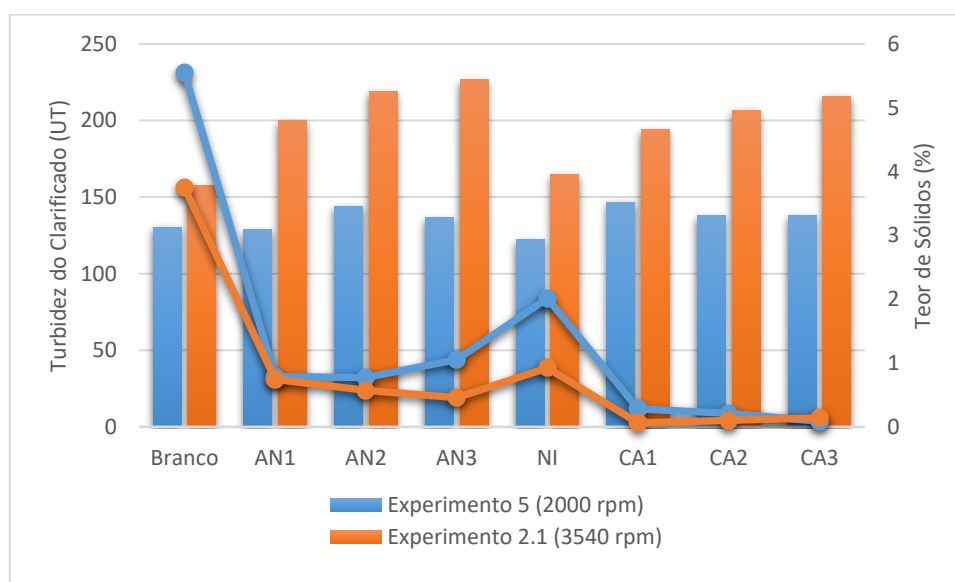


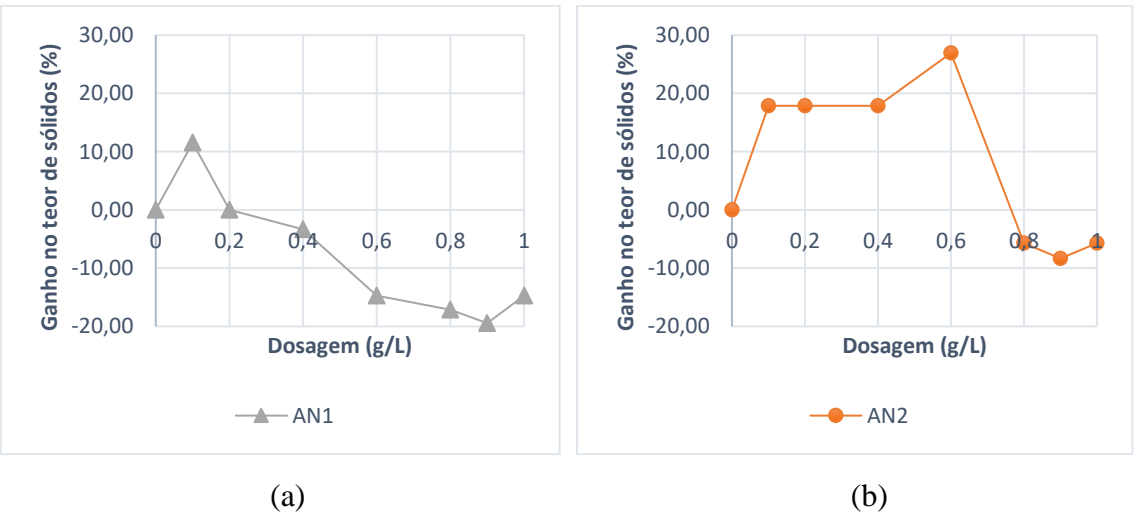
Figura 5.6 - Comparação dos resultados para teor de sólidos do lodo desidratado e turbidez residual do líquido clarificado dos Experimentos 5 (75% SM e 2000 rpm) e 2.1 (75% SM e 3540 rpm)

O ensaio, por sua vez, serviu para afirmar a influência da rotação e, portanto, do parâmetro G^* na eficiência da desidratação. Os valores encontrados para o teor de sólidos do lodo

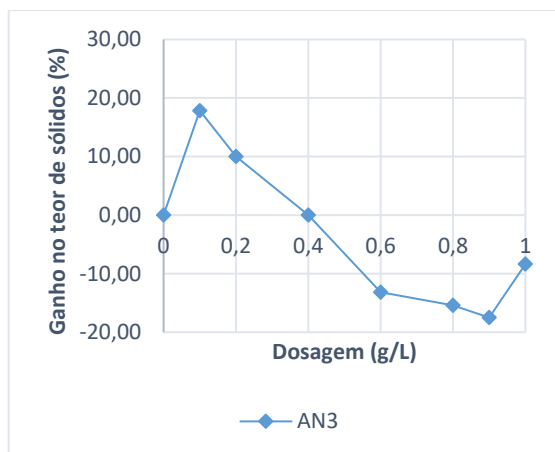
desidratado foram relativamente abaixo da média dos demais experimentos, como pode ser visto na Figura 5.6, que comparou o Experimento 5 (75% SM e 2000 rpm) com o Experimento 2.1 (75% SM e 3540 rpm). Essa relação já havia sido constatada por Reali et. al (1999) nos estudos citados neste tópico e também por Guimarães (2007).

5.2.2. Dosagem do polímero

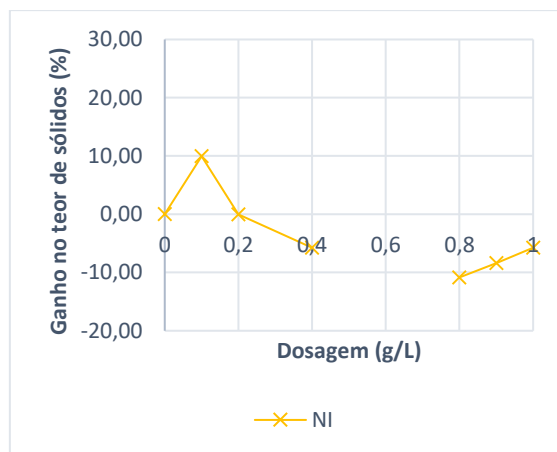
O Experimento 4, realizado com amostras de lodo provenientes da contribuição majoritária do reservatório Santa Maria (70%), em comparação aos ribeirões Torto e Bananal (30%), foi desenvolvido com a faixa de dosagem de polímeros aplicada mais abrangente para verificar se a faixa de dosagem que estava sendo aplicada e que usualmente é empregada na Estação de Tratamento de Água Brasília, variando de 0,1 a 0,4 gramas de polímero por litro de lodo (g/l), era realmente a faixa mais adequada para a desidratação do lodo ou se algum dos polímeros se comportaria melhor quando aplicada em doses diferentes, resultando nos dados contidos na Figura 5.7.



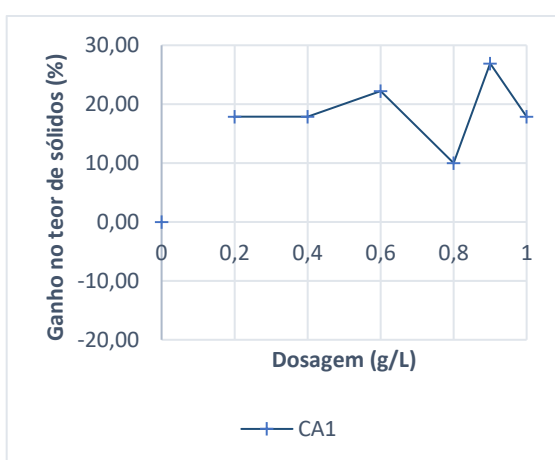
AN1	Aniônico com baixa densidade de carga	CA1	Catiônico com baixa densidade de carga
AN2	Aniônico com densidade média de carga	CA2	Catiônico com densidade média de carga
AN3	Aniônico com alta densidade de carga	CA3	Catiônico com alta densidade de carga
NI		Não Iônico	



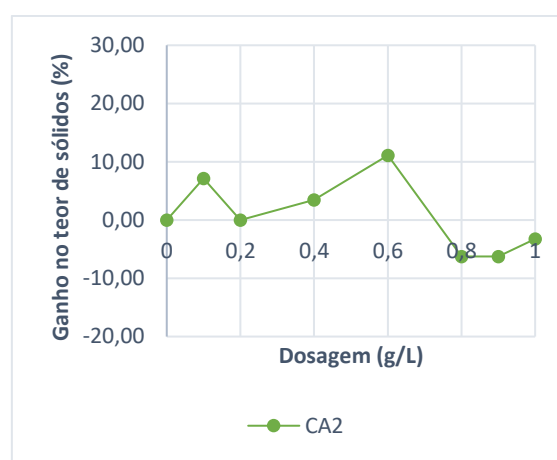
(c)



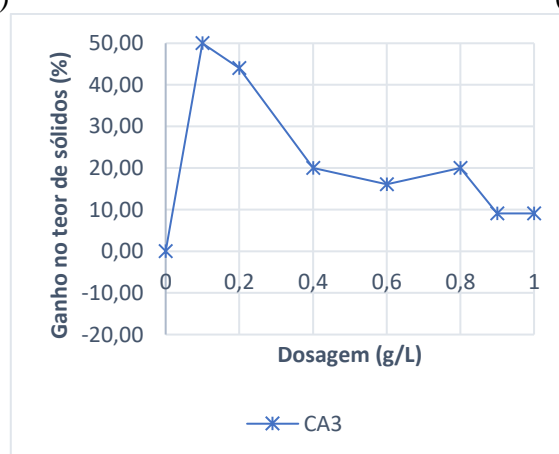
(d)



(e)



(f)



(g)

AN1	Aniônico com baixa densidade de carga	CA1	Catiônico com baixa densidade de carga
AN2	Aniônico com densidade média de carga	CA2	Catiônico com densidade média de carga
AN3	Aniônico com alta densidade de carga	CA3	Catiônico com alta densidade de carga
NI		Não Iônico	

Figura 5.7 - Influência da dosagem de polímeros no teor de sólidos totais da torta no Experimento 4 (70% SM) para os polímeros: (a) AN1 (b) AN2 (c) AN3 (d) NI (e) CA1 (f) CA2 (g) CA3

Analisando o gráfico, é possível perceber que os polímeros AN1, AN3, N1 e CA3 apresentaram certa tendência no comportamento com o aumento da dosagem do polímero, indicando que a faixa de concentração aplicada nos ensaios era adequada, pois foi a que apresentou os maiores incrementos no teor de sólido da torta, tendo esse valor decrescido a medida em que a dosagem foi elevada.

Os resultados obtidos por Wu *et al.* (1996) e Sun *et al.* (2015) mostraram a mesma tendência, onde o teor de sólidos do lodo desidratado aumenta inicialmente e depois diminui, chegando em alguns casos a apresentar valores de teor de sólidos menores do que a amostras sem aplicação de polímero, comportamento causado pelo estabelecimento de forças de repulsão entre as partículas, indicando entre esses dois comportamentos dosagens ótimas para o processo de desidratação.

Neste experimento, em termos de ganhos percentuais no teor de sólidos da torta, o polímero catiônico de alta densidade de carga (CA3) foi o que apresentou o melhor resultado dentre todos, o que ocorreu na faixa de dosagem de 0,1 – 0,2 g/L. Os demais polímeros apresentaram ganhos para esta faixa de dosagem, apesar desta não ter representado os seus valores ótimos. Observou-se também que os valores ótimos da desidratação para os demais polímeros catiônicos ocorreram em dosagens maiores, o que provavelmente está relacionado as menores densidades de carga desses materiais. O mesmo comportamento se repetiu para os polímeros aniônicos de alta densidade de carga (AN3) e média densidade de carga (AN2), não se reproduzindo, porém, para o polímero aniônico de baixa densidade de carga (AN1), o que indica a necessidade da realização de mais testes para confirmar esse comportamento.

A Tabela 5.7 mostra a comparação dos ensaios realizados no Experimento 2.1 e no Experimento 4, que foram realizados com lodo resultante de condições semelhantes de alimentação da ETA, sendo a contribuição do reservatório Santa Maria de 75% para o Experimento 2.1 e de 70% para o Experimento 4. Ressalta-se que o Experimento 4 foi realizado com a concentração da solução de polímero mais elevada em relação ao Experimento 2.1, já que para ter uma faixa mais abrangente de dosagem no Experimento 4, foi necessário aumentar a concentração da solução, passando de 0,2%, que é a usualmente aplicada na ETA, para 0,5%. Para verificar se a concentração da solução interfere no processo de desidratação, procedeu-se à realização de ensaios com diferentes concentrações

da solução de polímeros aplicando, porém, a mesma dosagem em todos eles, no valor de 0,1 gramas de polímero por litro de lodo flotado. Os resultados são apresentados na Figura 5.8.

Tabela 5.7 - Comparação dos resultados de teor de sólidos do lodo desidratado para os Experimentos 2.1 (75% SM) e 4 (70% SM).

Polímero	Experimento 2		Experimento 4	
	Teor de Sólidos Inicial (%)	Teor de Sólidos Final (%)	Teor de Sólidos Inicial (%)	Teor de Sólidos Final (%)
AN1	1,67	4,8	1,45	5,35
AN2		5,26		5,35
AN3		5,44		4,97
NI		3,96		4,64
CA1		4,66		5,35
CA2		4,96		5,16
CA3		5,18		5,80

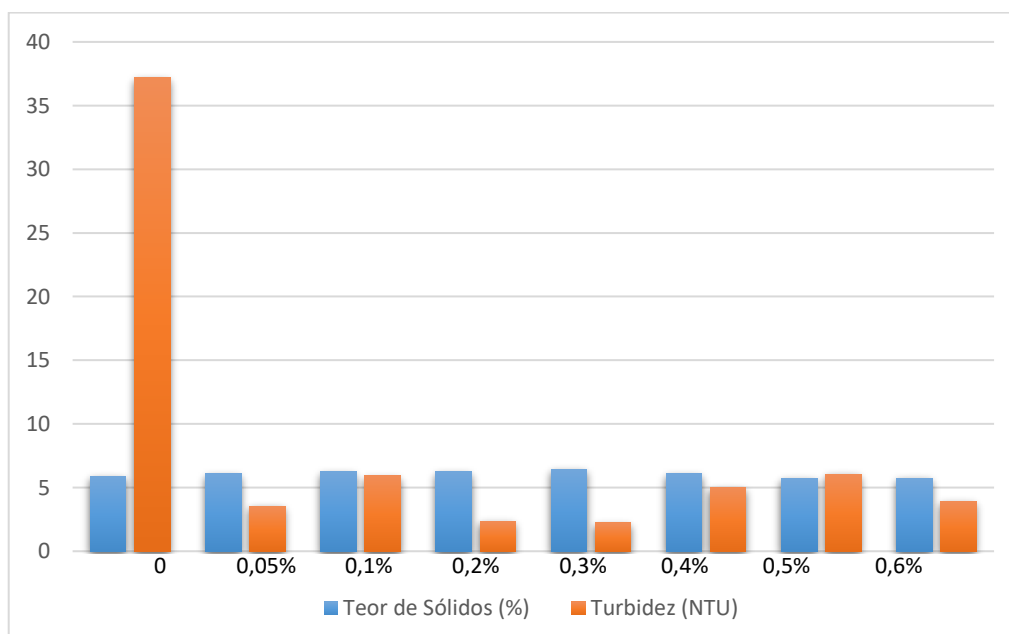


Figura 5.8 - Teor de sólidos e turbidez obtidos para diferentes concentrações do polímero CA3 no Experimento 6 (75% SM)

As faixas de concentração do polímero que forneceram as melhores combinações de resultados para o teor de sólidos da torta e para a turbidez do líquido clarificado foram 0,3%

e 0,2%, sucessivamente. Dessa forma, verificou-se que o aumento progressivo da concentração da solução do polímero não influencia positivamente na desidratação do lodo flotado, havendo assim como para as dosagens, valores ótimos entre soluções com baixas e altas concentrações.

5.2.3. Teor de Sólidos Inicial

Outra hipótese que havia sido levantada para o baixo desempenho do lodo da ETA Brasília no processo de centrifugação foi o fato de que o lodo flotado estando abaixo da faixa de teor de sólidos recomendada para as centrífugas (2-3%), influenciaria negativamente na desidratação. Ao longo dos experimentos, essa situação ocorreu, sem que isso influenciasse nos valores do teor de sólidos do lodo desidratado (torta). A Tabela 5.8 exemplifica essa situação, levando em consideração que os lodos foram obtidos a partir de condições semelhantes de alimentação da ETA e de realização dos ensaios.

Tabela 5.8 - Resultados da desidratação para diferentes teores de sólido inicial do lodo flotado com predominância do Reservatório Santa Maria

Experimento	Contribuição		Polímero	Concentração	Teor de Sólidos Inicial (%)	Teor de Sólidos Final (%)	Turbidez
	Santa Maria	Torta e Bananal					
Experimento 1.1	100%	0%	Branco	0	2,13	3,16	39,4
			AN3	0,1		4,68	22,4
			NI	0,1		3,43	8,61
			CA3	0,1		3,86	24,2
Experimento 2.1	75%	25%	Branco	0	1,67	3,78	156
			AN3	0,1		5,44	19,2
			NI	0,1		3,96	64
			CA3	0,1		5,18	6,74

Como é possível notar na Tabela 5.8, ainda que o teor de sólidos inicial (lodo flotado) tenha sido menor para o Experimento 2.1 do que para o Experimento 1.1 estando, inclusive, abaixo da faixa recomendada para o processo de centrifugação, os resultados foram ligeiramente superiores para o segundo experimento, o que descaracteriza a hipótese citada anteriormente, o que já havia ocorrido nas análises de Guimarães (2007). Recomenda-se, ainda, novos ensaios para constatar se essa situação se repete para valores acima da faixa recomendada,

uma vez que esse resultado foi influenciado também pela contribuição percentual menor da água do reservatório Santa Maria.

5.3. CONTRIBUIÇÕES DOS EXPERIMENTOS NO PROCESSO DE CENTRIFUGAÇÃO EM ESCALA REAL

A realização dos experimentos em escala de bancada no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) da Universidade de Brasília foram importantes para direcionar os testes que foram e os que ainda serão realizados em escala real na Estação de Tratamento de Água Brasília com o objetivo otimizar o processo de desidratação do lodo gerado nos flotores da ETA.

Experimentos preliminares à realização deste trabalho já haviam motivado a alteração do parâmetro velocidade diferencial das centrífugas da ETA, responsável por regular o tempo de detenção do lodo dentro das centrífugas, ocasionando o aumento do teor de sólidos totais do lodo desidratado da estação.

Já a partir dos resultados obtidos na Etapa I dos experimentos realizados neste trabalho, sugeriu-se a mudança do tipo de polímero empregado na ETA. O polímero aniônico de baixa densidade de cargas foi então substituído por um polímero catiônico com densidade média de cargas. Não houve alteração notável na tendência dos valores de teor de sólidos da torta, como ocorreu também nos experimentos em bancada. Porém, em alguns testes, a turbidez do líquido clarificado atingiu valores muito inferiores ao que usualmente é encontrado no clarificado da ETA, fato de grande relevância, uma vez que o líquido clarificado efluente às centrífugas muitas vezes retorna para o meio ambiente. No caso da ETA Brasília, após passar por uma lagoa de detenção, o líquido clarificado é lançado na rede de águas pluviais que tem como destino o Lago Paranoá.

É importante mencionar que, como já citado neste trabalho, o funcionamento das centrífugas em escala real depende de outros parâmetros além daqueles que controlam os experimentos de bancada como, por exemplo, a vazão de alimentação das centrífugas, que é inversamente proporcional ao valor de turbidez do líquido clarificado. Dessa forma, a turbidez mínima obtida foi referente à vazão de 3,5 m³/h de lodo, valor bem abaixo da capacidade das centrífugas e do que usualmente é utilizado na desidratação.

No entanto, o valor de turbidez encontrado para o polímero catiônico de 231 UT ainda assim foi expressivamente menor do que quando utilizado polímero aniônico sob as mesmas condições de operação e dos valores há algum tempo obtidos no clarificado da estação, por volta de 400-700 UT. Nos testes atuais com o polímero aniônico, o valor da turbidez ficou acima da faixa de medição do turbidímetro do laboratório de lodo da ETA Brasília, que é de 1000 UT.

Valores inferior para a turbidez do líquido clarificado também foram obtidos quando se alterou a espessura do “anel líquido” das centrífugas. Esse anel é responsável por controlar o nível do líquido dentro das máquinas e quanto menor a lâmina líquida, mais eficiente é a clarificação do líquido efluente (Reali, 2008; Pieralisi, 2009). Essa situação se comprovou nos testes, porém aberturas muito íngremes dos orifícios do anel com maior espessura acabaram ocasionando o entupimento das máquinas e inviabilizando o seu uso.

Por fim, os resultados obtidos na Etapa II dos experimentos influenciaram na decisão de alterar a concentração da solução de polímero, algo que ainda não havia sido realizado na estação, passando de 0,2% para 0,3%. A partir dessa mudança, houve um ligeiro aumento da eficiência do processo de centrifugação, mas não se pode afirmar que se deu exclusivamente pela alteração desse parâmetro já que no mesmo período houve modificações de outras variáveis, uma vez que a operação do sistema de lodo da ETA Brasília é um processo dinâmico.

Realizou-se ainda o Experimento Extra para analisar a hipótese levantada por funcionários da ETA de que o preparador de polímeros estaria com alguma avaria que não lhe permitisse preparar uma solução adequada para o tratamento. Dessa forma, recorreu-se ao laboratório para comparar a eficiência do processo de desidratação utilizando o polímero preparado na ETA Brasília e o preparado em laboratório, levando aos resultados representados na Figura 5.9.

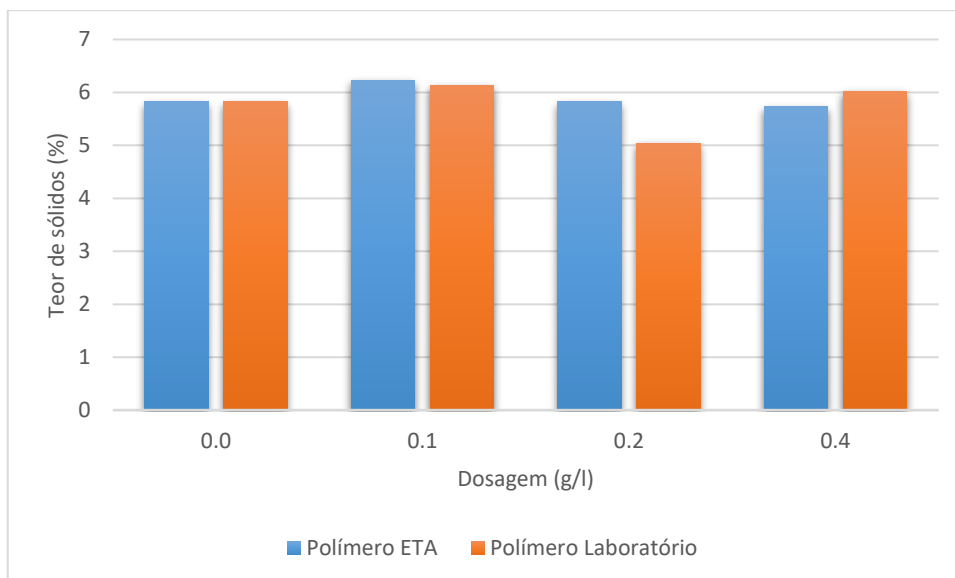


Figura 5.9 – Comparação do resultado obtido entre a aplicação polímeros preparados na ETA Brasília e no laboratório

Como é possível notar na Figura 5.9, os resultados foram muito semelhantes com a aplicação de ambos os polímeros, o que comprovou a correta preparação realizada pelos preparadores automatizados da ETA Brasília, descartando a sua deficiente operação como causa para o baixo valor do teor de sólidos.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para estudar o processo de desidratação dos resíduos gerados na ETA Brasília, realizou-se experimentos de centrifugação com a aplicação de polímeros com diferentes tipos e densidade de cargas em lodos com diferentes características, a se destacar a predominância mineral no lodo da água bruta proveniente dos Ribeirões Torto e Bananal e a influência orgânica do lodo advindo da água bruta do reservatório Santa Maria.

A primeira conclusão obtida a partir da análise dos resultados é que, de fato, a eficiência da desidratação de lodos com características orgânicas, conferida principalmente pela presença de algas no reservatório Santa Maria, é menor em função do percentual do conteúdo de água intracelular contida nestes organismos. Isso ficou evidente a partir da comparação do teor de sólidos do lodo desidratado para o lodo proveniente da contribuição exclusiva do reservatório Santa Maria e lodos com diferentes contribuições dos ribeirões Torto e Bananal na água bruta que abastece a ETA Brasília.

A aplicação de polímeros influencia positivamente na desidratação do lodo, apresentando ganhos discretos no teor de sólidos do lodo desidratado, e redução da concentração de sólidos suspensos no líquido clarificado efluente à centrífuga. Exclusivamente no caso da aplicação do polímero não iônico (sem cargas), não houve comprovação do aumento dos valores de teor de sólidos. No entanto, a redução da turbidez no líquido clarificado foi eficiente até mesmo no condicionamento com o uso desse polímero previamente à centrifugação.

Para as características do lodo flotado da ETA Brasília, os polímeros catiônicos apresentaram maior eficiência na retenção dos sólidos, resultando nos menores valores de turbidez para o líquido clarificado para todos os polímeros avaliados nos experimentos que foram realizados. Quando se considera o teor de sólidos do lodo desidratado (torta), o polímero aniônico de alta densidade de carga (AN3) se mostrou ligeiramente mais eficiente. Ressalta-se a não correspondência entre os menores valores de turbidez do líquido clarificado e os maiores valores do teor de sólidos do lodo desidratado, atribuindo esse comportamento à presença de partículas coloidais não aglomeradas ou repelidas no condicionamento com polímeros aniônicos.

No cenário atual das estações de tratamento de água, o parâmetro teor de sólidos do lodo desidratado é priorizado em relação à turbidez do líquido clarificado, principalmente por representar maiores custos de transporte e disposição final. Considerando este cenário para a ETA Brasília, o polímero aniônico de alta densidade de carga é o mais indicado quando predominar expressivamente a contribuição percentual dos ribeirões Torto e Bananal sobre o reservatório Santa Maria. Em cenários intermediários para o percentual de contribuição dos mananciais, a escolha deverá ser realizada a partir da análise financeira das opções de polímeros disponíveis, já que os resultados para os teores de sólidos do lodo desidratado para todos os polímeros testados foram bem próximos.

Porém, levando em consideração o cenário em que a importância de um tratamento de qualidade garanta não somente o teor de sólidos, mas também a turbidez do líquido clarificado adequados, potencializado pelo fato do efluente clarificado das centrífugas na ETA Brasília ter como destinação final a rede água pluvial que chega até o Lago Paranoá, importante manancial do Distrito Federal, o condicionamento com polímeros catiônicos é o mais adequado para esta estação.

Quanto ao efluente clarificado, recomenda-se ainda a análise da viabilidade da recirculação desse líquido na Estação de Tratamento de Água Brasília, visando reduzir as perdas da estação e os impactos ambientais relacionados à sua devolução ao meio ambiente. No caso de haver recirculação do clarificado, a turbidez residual deixaria de ser um fator de influência na escolha do polímero, já que representaria diferenças muito pequenas quando misturadas à água bruta afluente à ETA.

Já combinação dos polímeros analisadas neste trabalho se mostrou não promissora para ser aplicada em escala real, em função dos resultados obtidos que foram, no máximo, iguais ao da aplicação de somente um polímero, somados a necessidade de adequação na etapa de preparação do polímero que esta opção exige.

Ainda assim, recomenda-se a realização de novos testes com a combinação dos polímeros adicionados em sequência, bem como a análise da sequência mais adequada de aplicação de cada um destes materiais, para avaliar os efeitos no teor de sólidos do lodo desidratado e na presença de sólidos suspensos no efluente clarificado, além da análise da combinação dos polímeros aniônicos ou catiônicos com polímeros não iônicos.

A concentração da solução do polímero a nível de bancada não apresentou influência significativa na desidratação do lodo e os experimentos demonstraram que a faixa adotada na ETA Brasília é aceitável. Já as dosagens ótimas das soluções de polímero estão vinculadas à densidade de carga de cada um destes materiais, devendo esta ser adotada a partir do polímero catiônico adquirido para o condicionamento do lodo flotado na estação.

Por fim, conclui-se que a simples aplicação de polímeros no lodo flotado com presença de matéria orgânica não é suficiente para elevar significativamente a concentração de sólidos do lodo desidratado da ETA Brasília, recomendando-se também a análise da eficiência de processos a serem aplicados previamente à desidratação, a citar a correção do pH para valores de pH neutro do lodo flotado e o seu adensamento, elevando o teor de sólidos totais do lodo flotado a níveis acima dos que foram obtidos neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004 (2004). *Resíduos Sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.216 (1992). *Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público*. Rio de Janeiro, Brasil.
- APHA, AWWA, WPCF (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20a edição, Washington, E.U.A.
- Ayol A., Dentel, S.K., F. Ayse. (2005). “Dual Polymer Conditioning of Water Treatment Residuals”. *Journal of Environmental Engineering. ASCE*. **131**(8), 1132-1138.
- AWWA – American Water Works Association. (1999). *Management of Water Treatment Plant Residuals*. American Society of Civil Engineers, New York, E.U.A, 294p.
- Bache, D.H. e Papavasiliopoulos, E.N. (2003). “Dewatering of alumino-humic sludge: impacts of hydroxide.” *Water Research* **37**(2003), 3289-3298.
- Bittencourt, S., Serrat, B.M., Aisse, M. M., Marin, L.M.K.S., Simão, C.C. (2012). “Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado.” *SciELO* **17**(3), 315-324.
- Brasil (2011). Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914, de 12/12/2011. “Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.” *Diário Oficial da União*, Poder Executivo, Brasília, DF, 14/12/2011.
- Brasil (2010). Ministério do Meio Ambiente. Lei nº 12.305, de 02/08/2010. “Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.” *Diário Oficial da União*, Poder Executivo, Brasília, DF, 02/08/2010.
- Caesb (2011). *Manual de operação da ETA Brasília*, Distrito Federal, 223p.
- Centurione Filho, P.L. (2002). *Desenvolvimento e Operação de uma Instalação de Flotação por Bancada para Águas de Abastecimento*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 313p.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2010). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. “Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA”. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 16/05/2011.

- Constantino, A. F. e Yamamura, V.D. (2009). “Redução do gasto operacional em estação de tratamento de água utilizando o PAC.” *Anais do Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana – SIMPGEU*, Maringá, Brasil.
- Di Bernardo, L. e Paz, L. P. S. (2009). *Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água*. LDIBE LTDA, São Carlos, Brasil, 878p.
- Di Bernardo, L., Dantas, A.D.B. e Voltan, P.E.N. (2012). *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água*. LDIBE, São Carlos, Brasil, 540p.
- Edzwald, K.J. (2010). “Dissolved air flotation and me.” *ScienceDirect*, **44**(2010), 2077-2106.
- Freitas, J.G., Filho, S.S.F., Piveli, R.P. (2005) “Viabilidade técnica e econômica da regeneração de coagulantes a partir de lodos de estações de tratamento de água”. *SciELO – Eng. Sanit. Ambient.*, **10**(2), 137-145.
- Guimarães, G.C. (2007). *Estudo do Adensamento e Desidratação dos Resíduos Gerados na ETA-Brasília*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 118p.
- Hoppen, C., Portella K.F., Joukoski, A., Baron, O., Franck, R., Sales, A., Andreoli, C.V., Paulon, V.A. (2005). “Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental”. *SciELO – Cerâmica*, 51(2005), 85-95.
- Huang, C., Pan, J.R., Liu, Y. (2005). “Mixing Water Treatment Residual with Excavation Waste Soil in Brick and Artificial Aggregate Making”. *Journal of Environmental Engineering*, **131**(2), 272-277.
- Hu, Y. e Wang, Y. (2017). “Study on the dewatering process for water treatment residuals: applicability of freezing-thawing, compression, and eletrectro-osmotic treatment”. *Drying Technology*, **35**(12), 1450-1459.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2008). *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Ippolito, J.A. (2015). “Aluminum-Based Water Treatment Residual Use in a Constructed Wetland for Capturing Urban Runoff Phosphorus: Column Study”. *Water Air Soil Pollut*, (2015), 226-234.

- Ma, W., Zhao Y.Q. e Kearney P. “A study of dual polymer conditioning of aluminum-based drinking water treatment residual.” *Journal of Enviromental Science and Health, Part A*, **42**(7), 961-968.
- Metcalf & Eddy. (2016). *Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos*. Tradução de Ivanildo Hespanhol e José Carlos Mierzwa. 5ed. AMGH Editora Ltda, São Paulo, Brasil, 1927p.
- Oliveira, E.M.S., Holanda, J.N.F. (2008). “Influência da adição de resíduo (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha”. *SciELO – Cerâmica*, **54**(2008), 167-173.
- Pan, J. R., Huang, C., Chuang, Y., Wu, C. (1998). “Dewatering characteristics of algae-containing alum aludge”. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **150**(1999), 185-190.
- Pieralisi. (2009). Manual de montagem, operação e manutenção – P600/Decanter Centrífugo. Jundiaí, SP, 61p.
- Realí, M.A.P (coordenador). (1999). Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água. *Projeto Prosab*, ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 240p.
- Realí, M.A.P., Cordeiro, J.S., Patrizzi, L.J. (1999). “Proposição de método para ensaios de remoção de água de lodos por centrifugação”. *Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Ritcher, C.A. (2001). *Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água*. Edgard Blucher LTDA, São Paulo, Brasil, 102p.
- Sun, Y., Fan, W., Huaili Z., Zhang, Y., Li, F. e Chen, W. (2015). “Evaluation of dewatering performance and fractal characteristics of alum sludge”. *PLoS ONE* **10**(6), 1-16.
- Teixeira, S.T., Melo, W.J., Silva, E.T. (2005). “Aplicação de lodo da estação de tratamento de água em solo degradado”. *SciELO - Pesq. Agropec. Bras.*, **40**(1), 91-94.
- Wu, C.C., Huang, C. e Lee, D.J. (1996). “Effects of Polymer dosage on alum sludge dewatering characteristics and physical properties.” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **122**(1997), 99-96.
- Yan, A., Li, J., Liu, L., Ma, T., Liu, J. e Ni, Y. (2017). “Centrifugal dewatering of blended sludge from drinking water treatment plant and wastewater treatment plant.” *J Mater Cycles Waste Manage*, **20**(2018), 421-430.

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS ÓTIMOS OBTIDOS NA ETAPA I – EXPERIMENTOS 1.1 E 1.2

Experimento	Contribuição		Água Bruta				Ensaio		Polímeros								
	Santa Maria (SM)	Torto e Bananal (TB)	pH	Cor	Turbidez	Algas (Ind/L)			PAC (mg/l)	Branco	AN1	AN2	AN3	NI	CA1	CA2	CA3
1.1	100	0	6,5	11	1,49	1,49x10 ⁵		3,0	Conc. (%)	0	0,2						
								Dose (g/l)	0	0,2	0,4	0,1	0,1	0,4	0,4	0,4	
								TSI (%)	2,02					2,13			
								TSF (%)	3,16	3,93	4,41	4,68	3,43	3,90	3,97	4,05	
								Turb. (UT)	-	23,75	24,10	22,40	39,9	6,26	7,23	4,47	
1.2	30	70	6,3	7	1,36			3,0	Conc. (%)	0	0,2						
								Dose (g/l)	0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,4	0,2	0,1	
								TSI (%)	2,28								
							TSF (%)	6,82	8,12	8,42	10,14	7,18	9,38	8,03	8,33		
							Turb. (UT)	-	26,95	24,50	19,30	16	3,64	8,79	4,46		

Legenda: Conc. – Concentração, TSI – Teor de sólidos inicial, TSF – Teor de sólidos final, Turb. – Turbidez

* Os dados dos parâmetros algas se referem às análises mais próximas da coleta das amostras para os experimentos de centrifugação e a presença das algas se relaciona, principalmente, ao reservatório Santa Maria.

APÊNDICE B – RESULTADOS ÓTIMOS OBTIDOS NA ETAPA I – EXPERIMENTOS 2.1 E 2.2

Experimento	Contribuição		Água Bruta							Polímeros								
	Santa Maria (SM)	Torto e Bananal (TB)	pH	Cor	Turbidez	Algas (Ind/L)	PAC (mg/l)			Branco	AN1	AN2	AN3	NI	CA1	CA2	CA3	
2.1	75	25	6,8	6	1,21	1,49x10 ⁵	3,0	Ensaio	Conc. (%)	0	0,2							
							Dose (g/l)		0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
							TSI (%)		1,67									
							TSF (%)		3,78	4,80	5,26	5,44	3,96	4,66	4,96	5,18		
							Turb.(UT)		156,1	30,95	23,80	19,15	64,45	38,9	14	6,74		
							Conc. (%)		0	0,2								
							Dose (g/l)		0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4		
							TSI (%)		1,67									
							TSF (%)		3,84	5,03	5,17	5,26	4,28	4,52	4,52	5,35		
							Turb.(UT)		150,6	27,85	17,2	24,05	34,15	4,95	4,97	6,8		
2.2	55	45	6,7	9	1,61		2,5											

APÊNDICE C – RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA I – EXPERIMENTO 3

Experimento	Contribuição		Água Bruta					Ensaio		Polímeros								
	Santa Maria (SM)	Torto e Bananal (TB)	pH	Cor	Turbidez	Algas (Ind/L)	PAC (mg/l)			Branco	AN3	AN3/ CA1	AN3/ CA2	AN3/ CA3	CA3	CA3/ AN1	CA3/ AN2	
3	75	25	6,3	21	1,20	2,19x10 ⁵	4,5		Conc. (%)	0	0,2							
									Dose (g/l)	0	0,2							
									TSI (%)	1,45								
									TSF (%)	3,92	4,35	4,42	4,57	4,64	4,64	4,57	4,09	
									Turb.(UT)	29,05	12,95	10,75	8,80	13,05	3,35	1,67	12,85	

APÊNDICE D – RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA II – EXPERIMENTOS 4 E 5

Experimento	Contribuição		Água Bruta							Polímeros							
	Santa Maria (SM)	Torto e Bananal (TB)	pH	Cor	Turbidez	Algas (Ind/L)	PAC (mg/l)			Branco	AN1	AN2	AN3	NI	CA1	CA2	CA3
4	70	30	6,8	8	1,44	2,19x10 ⁵	Ensaio	Conc. (%)	0	0,5							
								Dose (g/l)	0	0,1	0,6	0,1	0,1	0,9	0,6	0,1	
								TSI (%)	1,45								
								TSF (%)	4,31	5,35	5,35	4,97	4,64	5,45	5,16	5,80	
								Turb. (UT)	43,5	28,5	36,4	24,3	25,6	4,46	6,29	4,59	
5*	75	25	6,5	6	1,32	2,19x10 ⁵		Conc. (%)	0	0,3							
								Dose (g/l)	0	0,3							
								TSI (%)	1,45								
								TSF (%)	3,03	3,09	3,46	3,28	-	3,52	3,31	3,31	
								Turb. (UT)	157	32,85	32,20	43,95	-	11,70	8,78	3,64	

* O experimento 5 foi realizado com velocidade de 2000rpm.

APÊNDICE E – RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA II – EXPERIMENTO 6

Experimento	Contribuição		Água Bruta				Ensaio	Polímero CA3									
	Santa Maria (SM)	Torto e Bananal (TB)	pH	Cor	Turbidez	Algas (Ind/L)		PAC (mg/l)	Conc. (%)	Branco	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	75	25	6,5	6	1,32	2,19x10 ⁵		3,0	Dose (g/l)	0	0,1						
									TSI (%)	2,15							
									TSF (%)	5,90	6,07	6,25	6,25	6,45	6,07	5,73	5,75
									Turb. (UT)	37,2	3,54	5,94	2,37	2,24	5	6,05	3,92

APÊNDICE E – RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA II – EXPERIMENTO EXTRA

Experimento Extra*	Contribuição		Água Bruta				Ensaio		Polímero CA2 - ETA				Polímero CA2 - LSA				
	Santa Maria (SM)	Torto e Bananal (TB)	pH	Cor	Turbidez	Algas (Ind/L)		PAC (mg/l)	Dose (g/l)	Branco	0,1	0,2	0,4	Branco	0,1	0,2	0,4
	-	-	-	-	-	2,19x10 ⁵		-	Conc. (%)	0	0,2						
									TSI (%)	1,88							
									TSF (%)	5,82	6,22	5,82	5,73	5,82	6,13	5,64	6,02
									Turb. (UT)	80,1	3,03	3,14	6,14	50,15	2,15	3,54	4,66

* A amostra de lodo para o Experimento Extra foi obtida na entra da centrífuga, não sendo possível afirmar com precisão quais eram as contribuições e os valores dos parâmetros para este lodo.